ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

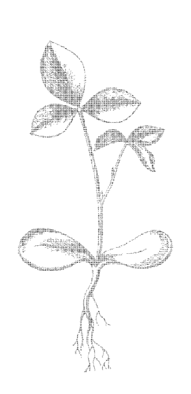
Р. Х. БАЛЬЯН

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

СУДПРОМГИЗ — 1961

Р. Х. БАЛЬЯН

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ СОЮЗНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Ленинград
1961

Книга освещает вопросы теории, расчета, конструирования и технологии изготовления силовых трансформаторов малой мощности нормальной и повышенных частот, выходных трансформаторов специальных генераторов повышенной и ультразвуковой частот и трансформаторов для питания схем заряда емкостных накопителей, применяемых в различных областях приборостроения, радиотехники, автоматики, ультразвуковой техники и т. д.

Книга предназначена для инженерно-технических работников промышленности и научно-исследовательских организаций, занятых проектированием и эксплуатацией подобных трансформаторов и аппаратуры, в которой эти трансформаторы применяются

Книга может быть также использована в качестве учебного пособия студентами институтов и техникумов соответствующих специальностей

ОТ АВТОРА

В настоящей книге обобщен опыт разработки трансформаторов малой мощности, находящих применение в радиоэлектронике, автоматике, приборостроении и т. д. При этом основное внимание уделено новым, прогрессивным приемам конструирования и изготовления трансформаторов с использованием современных магнитных и электроизоляционных материалов. В этом направлении в отечественной технике благодаря усилиям большого коллектива инженеров и техников достигнуты значительные успехи.

Теоретическая часть книги основывается, главным образом, на работах автора. Ряд результатов в области технологии изготовления и выбора магнитных материалов получен в процессе работы, проведенной под его руководством.

Автор выражает глубокую признательность А. И. Клюсс и М. В. Лукьянову, взявшим на себя труд просмотреть отдельные главы рукописи, К. Г. Бирагову, выполнившему существенную часть рисунков, Л. М. Гарткевич и другим своим сотрудникам, участвовавшим в проведении экспериментальной и расчетной работы, а также всем тем лицам, которые помогли ему ценными советами и сведениями.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БТ — броневой трансформатор
В — выпрямитель
ВТ — выходной трансформатор
ВТН — настраиваемый выходной трансформатор
ВТНН — ненастраиваемый выходной трансформатор
П — поверхность охлаждения
$П_к$ — поверхность охлаждения катушек (на фазу)
$П'_к$ — полная наружная поверхность катушек (на фазу)
$П_с$ — поверхность охлаждения сердечника
СТ — стержневой трансформатор
ІСТ — однокатушечный стержневой трансформатор
Т — трансформатор
ТП — трансформатор питания
ТТ — тороидальный трансформатор
3Т — трехфазный трансформатор
Ц — стоимость активных материалов
Э — обобщенный экономический показатель (вес, объем или стоимость в общем виде)
$к_1$ — вспомогательный коэффициент: $к_1 = \frac{4,44 \times 10^{-6}}{n}$
$к_I$ — коэффициент, учитывающий падение напряжения в первичной обмотке
$к_{II}$ — то же для вторичных обмоток
$к_а$ — коэффициент заполнения окна алюминием
$к_в$ — коэффициент, учитывающий вид схемы выпрямления при приведении вторичного тока к первичной обмотке
$к_{вып}$ — коэффициент выпучивания при намотке катушек
$к_к$ — коэффициент учета уравнительных токов в обмотках катушек выходного трансформатора
$к_м$ — коэффициент заполнения окна медью
$к_{ну}$ — коэффициент, отражающий наличие неучитываемых потерь в выходном трансформаторе
$к_{ок}$ — коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом
$к_с$ — коэффициент заполнения сердечника магнитопроводящим материалом
$к_т$ — коэффициент трансформации (от большего числа витков к меньшему)
$к'_т$ — то же, но в обратном порядке
$к_{укл}$ — коэффициент укладки при намотке катушек
$к_ц$ — коэффициент геометрии по стоимости
$к_э$ — коэффициент геометрии в общем виде (по объему, весу или стоимости)
$к'_э$ — его промежуточное значение
$к_{Fe}$ — коэффициент зависимости между B и $H_{\sim}$ на линейном участке кривой намагничивания
$к_g$ — коэффициент геометрии по весу
$к_I$ — коэффициент увеличения габаритной мощности выходного трансформатора против мощности вторичной обмотки

$к_j$ — коэффициент, учитывающий распределение проводников в катушках высоковольтных тороидальных трансформаторов

$к_p$ — коэффициент нарастания мощности ряда трансформаторов

$к_p$ — коэффициент увеличения потерь в готовом сердечнике по сравнению с потерями исходного материала

$к_{p\delta}$ — коэффициент роста потерь в сердечнике при введении зазора

$к_u$ — коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотках

$к_v$ — коэффициент геометрии по объему

$к_\delta$ — коэффициент необходимого увеличения расчетного зазора в сердечнике ВТН из-за явления выпучивания

т. м. м. — трансформатор малой мощности

ц — удельная стоимость материалов трансформатора

э — удельный экономический показатель в общем виде (удельный объем, вес и стоимость)

B — магнитная индукция

B_{xx} — индукция в сердечнике при холостом ходе трансформатора

B_0 — индукция, отсекаемая продолжением линейного участка кривой намагничивания на оси ординат (по рис. 80)

B_i — произвольное значение индукции

B_n — ее фиксированное значение

B_r — остаточная индукция

C — емкость накопителя

$D_н$ — наружный диаметр тороидального сердечника; барометрическое давление окружающей среды

D_0 — фиксированное значение давления

$D_{ср}$ — средний диаметр тороидального сердечника

E — действующее значение э. д. с.

E_d — электрическая прочность изоляционных материалов в действующих значениях

G — вес трансформатора

$G_с$ — вес магнитного материала сердечника (на фазу)

$G_к$ — вес проводникового материала катушек (на фазу)

$G_{из}$ — вес изоляции (на фазу)

$H_\sim$ — действующее значение напряженности намагничивающего магнитного поля (на переменном токе)

I — приведенное к первичной обмотке действующее значение вторичного тока (нагрузочная составляющая первичного тока); в главе VI — действующее значение тока во вторичной обмотке

$I_з$ — действующее значение тока в зарядном сопротивлении

I_0 — полный ток намагничивания в номинальном (рабочем) режиме; в главе VI — средний ток через накопитель за время заряда

$I_{0_{xx}}$ — полный ток намагничивания при холостом ходе

I_{0a} — активная составляющая полного тока намагничивания в номинальном (рабочем) режиме

$I_{0\mu}$ — его реактивная (намагничивающая) составляющая

$I_{0\mu_{xx}}$ — то же при холостом ходе трансформатора

I_1 — ток первичной обмотки (действующее значение)

I_{di} — выпрямленный ток нагрузки i-той обмотки (среднее значение)

I_i — ток i-той (вторичной) обмотки (действующее значение)

I_m — максимальный ток в цепи во время заряда накопителя

I_{mm} — то же во время начального включения схемы заряда

$I_{m_{доп}}$ — допустимый максимальный ток для выпрямителя

L_1 — индуктивность первичной обмотки

N — число обмоток трансформатора

P — электромагнитная мощность трансформатора

$P_г$ — габаритная мощность трансформатора

$P_{г0}$ — характерная габаритная мощность выходного трансформатора (при характерной частоте в непрерывном режиме)

$P_з$ — мощность зарядного сопротивления

$P_{о.\ е.}$ — электромагнитная мощность трансформатора в относительных единицах

$P_т$ — габаритная мощность типоразмера сердечника

$P_{т0}$ — габаритная мощность типоразмера сердечника (при характерной частоте в непрерывном режиме)

P_0 — полная мощность намагничивания в номинальном (рабочем) режиме

P_{0a} — ее активная составляющая

$P_{0\mu}$ — ее реактивная (намагничивающая) составляющая

P_1, P_I — полная мощность первичной обмотки трансформатора (первичная мощность)

P_{II} — полная вторичная мощность трансформатора (сумма мощностей вторичных обмоток)

P_B — граничная мощность, разделяющая зоны выбора индукции из различных условий

P_{Fe} — составляющая мощности намагничивания, приходящаяся на тело сердечника

P_i — полная мощность i-той вторичной обмотки трансформатора

P_j — граничная мощность, разделяющая зоны выбора плотности тока из различных условий

P_δ — составляющая мощности намагничивания, приходящаяся на воздушный зазор в сердечнике

Q — удельная мощность намагничивания магнитного материала; скважность (для повторно-кратковременных режимов)

R — величина полного сопротивления цепи заряда накопителя

$R_з$ — величина зарядного сопротивления в схеме заряда накопителя

$R_н$ — сопротивление нагрузки трансформатора

$R'_н$ — то же, приведенное к первичной стороне

$R_{ог}$ — величина ограничительного сопротивления в схеме заряда накопителя

T — тепловая постоянная нагрева трансформатора

U — действующее значение напряжения

ΔU — абсолютная величина полного падения напряжения в трансформаторе

$U_{исп}$ — испытательное напряжение обмотки

$U_{обр}$ — обратное напряжение на выпрямителе

$U_{пр}$ — пробивное напряжение для электрической изоляции

$U_р$ — расчетное напряжение обмотки для определения $U_{исп}$, учитывающее влияние величины $U_=$

$U_с$ — напряжение питающей сети (действующее значение)

U_{di} — выпрямленное напряжение нагрузки i-той обмотки (среднее значение)

U_i — напряжение i-той (вторичной) обмотки (действующее значение)

$U_{0к}$ — конечное напряжение на накопителе (после окончания заряда)

U_{01} — начальное напряжение на накопителе (после его разряда на нагрузку)

U_1 — напряжение первичной обмотки (действующее значение)

$U_=$ — постоянный потенциал, приложенный к обмотке

V — объем, занятый трансформатором (габаритный)

$V_к$ — объем катушек (на фазу)

$V_с$ — объем сердечника (на фазу)

a — ширина несущего стержня сердечника (рис. 90)

b — толщина сердечника (рис. 90)

c — ширина окна сердечника (рис. 90); удельная теплоемкость

$c_{из}$ — удельная теплоемкость изоляции

$c_к$ — то же для проводникового материала

$c_с$ — то же для сердечника

d — внутренний диаметр тороидального сердечника

e — мгновенное значение э. д. с.

f — частота (и знак функциональной зависимости)

g — удельный вес трансформатора

h — высота окна сердечника (рис. 90)

i — мгновенное значение тока

i_0 — относительная величина тока намагничивания в номинальном (рабочем) режиме; в главе VI — среднее значение тока во вторичной обмотке трансформатора за полупериод

i_{eff} — действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора за полупериод

j — плотность тока

j_i — то же в i-той обмотке

l — линейный размер в общем виде

$l_к$ — длина среднего витка обмотки в катушке трансформатора

$l_с$ — длина средней магнитной линии

l_s — длина путей потоков рассеяния

m — число фаз трансформатора

m' — число стержней сердечника, несущих обмотку

n — расчетный коэффициент:

$$n = 1 + \sqrt{1 + i_0^2}$$

$n_с$ — число сердечников в группе ряда

p — потери мощности

Σp — суммарные потери в трансформаторе

$p_{доп}$ — допустимые потери

$p_{доп_у}$ — учитываемые допустимые потери в выходном трансформаторе

$p_к$ — потери в катушках трансформатора (на одну фазу)

$p_с$ — полные потери в сердечнике (на одну фазу)

p_{10} — удельные потери в готовом сердечнике при индукции 10 000 *гс*

p'_{10} — удельные потери исходного магнитного материала при индукции 10 000 *гс*

p_i — удельные потери в готовом сердечнике при некоторой индукции B_i

p'_i — удельные потери исходного магнитного материала при некоторой индукции B_i

p'_n — то же при фиксированной индукции B_n

q — сечение провода

r — активное сопротивление переменному току

$r_в$ — сопротивление выпрямителей

$r_к$ — активное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$r_{т2}$ — сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$r'_{т1}$ — сопротивление первичной обмотки трансформатора, приведенное ко вторичной

$r_=$ — активное сопротивление постоянному току

r_i — сопротивление i-той обмотки трансформатора

r'_i — сопротивление обмотки одной стороны трансформатора, приведенное к его другой стороне

$s_с$ — геометрическое сечение сердечника

$s_{ок}$ — геометрическое сечение окна (на фазу)

t — время

$t_и$ — длительность рабочего периода (импульса) при повторно-кратковременном режиме работы

$t_п$ — длительность паузы между рабочими периодами

$t_ц$ — длительность цикла (рабочего периода с паузой)

u — мгновенное значение напряжения

Δu — относительная величина полного падения напряжения в трансформаторе

$u_к$ — напряжение короткого замыкания трансформатора (в относительных единицах)
$u_{ка}$ — его активная составляющая
$u_{кx}$ — его реактивная составляющая
u_0 — мгновенное значение напряжения на накопителе
u_{a1}, u_{a2} — части $u_{ка}$, приходящиеся на первичную и вторичные обмотки
v — удельный объем трансформатора
w — число витков обмотки
w_1 — число витков первичной обмотки
w_i — то же i-той вторичной обмотки
x — ширина окна в относительных единицах: $x = \frac{c}{a}$
$x_к$ — реактивное сопротивление короткого замыкания
x_i — реактивное сопротивление i-той обмотки трансформатора
y — толщина сердечника в относительных единицах $y = \frac{b}{a}$
z — высота окна сердечника в относительных единицах: $z = \frac{h}{a}$
$z_к$ — полное сопротивление короткого замыкания
Δ — символ изменения, различия уровней; толщина материала; толщина изоляции между обмотками трансформатора
Δ_1 — толщина первичной обмотки трансформатора (рис. 67)
Δ_2 — толщина вторичной обмотки трансформатора (рис. 67)
Δ' — расчетный параметр по (21)
ΔU — падение напряжения в трансформаторе (абсолютная величина)
Δu — падение напряжения в трансформаторе (относительная величина)
$\Delta\tau$ — перегрев над температурой окружающей среды
$\Delta\tau_к$ — перегрев катушек над температурой окружающей среды
$\Delta\tau_0$ — то же для некоторых фиксированных условий
Σp — суммарные потери в трансформаторе
α — удельный коэффициент теплоотдачи; в главе VI — отношение конечного и начального напряжений на накопителе
$\alpha_к$ — удельный коэффициент теплоотдачи для катушки
α_0 — то же для некоторых фиксированных условий
β — соотношение поверхностей охлаждения сердечника и катушек: $\beta = \frac{П_с}{П_к}$
$\gamma_а$ — удельный вес алюминия
$\gamma_к$ — удельный вес проводникового материала катушки
$\gamma_м$ — удельный вес меди
$\gamma_с$ — удельный вес материала сердечника
δ — воздушный зазор в сердечнике на одну сторону
δ_0 — воздушный зазор, вводимый в сердечник ВТН
ε — основание логарифмов
ε_p — коэффициент допустимого увеличения потерь в повторно-кратковременном режиме
θ — угол отсечки выпрямляемого тока
$\theta_к$ — угол отсечки в последний полупериод заряда накопителя
θ_1 — угол отсечки в первый полупериод заряда накопителя
θ_n — то же в произвольный полупериод заряда
$\varkappa$ — степенной показатель зависимости удельных потерь p_i' и p_i от частоты
μ — магнитная проницаемость материала
μ_0 — начальная магнитная проницаемость материала
μ_{max} — максимальная магнитная проницаемость
$\mu_{эфф}$ — эффективная магнитная проницаемость сердечника
ν — соотношение потерь в сердечнике и катушках трансформатора

ν_0 — оптимальное значение соотношения потерь
ρ — удельное сопротивление проводникового материала обмоток (в горячем состоянии)
ρ_{20° — то же при 20° С
τ — абсолютная температура (°С); в главе VI — постоянная времени заряда конденсатора выпрямленным током
$\tau_{окр}$ — температура окружающей среды
τ_c — постоянная времени заряда конденсатора постоянным током
η — к. п. д. трансформатора
$\varphi_к$ — безразмерная функция, зависящая от геометрии сердечника и определяющая через ширину стержня сердечника a величину $V_к$
$\varphi_н$ — фазовый угол нагрузки
$\varphi_{ок}$ — безразмерная функция, зависящая от геометрии сердечника и определяющая через ширину стержня сердечника a величину $s_{ок}$
$\varphi_{пк}$ — то же для величины $П_к$
$\varphi'_{пк}$ — то же для величины $П'_к$
$\varphi_{пс}$ — то же для величины $П_с$
$\varphi_с$ — то же для величины $V_с$
$\varphi_ц$ — то же для величины Ц
$\varphi_э$ — то же для величины Э
φ_B — безразмерная функция, определяющая зависимость от геометрии трансформатора допустимой индукции в сердечнике при повышенных частотах
φ_g — безразмерная функция, зависящая от геометрии сердечника и определяющая через ширину стержня сердечника a величину G
φ_i — безразмерная функция в общем виде, зависящая от геометрии сердечника и определяющая через ширину стержня сердечника a различные геометрические и экономические показатели трансформатора
φ_j — безразмерная функция, определяющая зависимость от геометрии трансформатора допустимой плотности тока в его обмотках
φ_l — безразмерная функция, зависящая от геометрии сердечника и определяющая через ширину стержня сердечника a величину l_c
φ_s — то же для величины s_c
φ_v — то же для величины V
φ_η — безразмерная функция, определяющая зависимость от геометрии трансформатора его к. п. д.
φ_ν — коэффициент, отражающий режим работы трансформатора по (78)
$\varphi_{\nu=1}$ — то же при $\nu = 1$
ω — угловая частота

Индексы при буквенных обозначениях

а — алюминий
доп — допустимая величина
к — катушки
м — медь
о — оптимальное значение
с — сердечник
хх — режим холостого хода
0 — токи и мощности намагничивания; среднее значение
i — одна из обмоток; некоторое значение данной величины
m, max — максимальное значение
min — минимальное значение
n — фиксированное значение данной величины
p — потери; потери в сердечнике
μ — намагничивающая (реактивная) составляющая

ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторами малой мощности (т. м. м.) принято считать трансформаторы, габаритная мощность которых не превосходит величины в несколько тысяч вольт-ампер (*ва*). Роль подобного класса трансформаторов неизмеримо выросла за последние годы, когда бурное развитие радиотехники, автоматики, приборостроения потребовало широкого применения т. м. м. для питания накальных и анодных цепей электронных и ионных приборов, схем магнитных усилителей, полупроводниковых выпрямителей, обмоток реле, различных устройств индикации, для согласования сопротивлений в разных схемных звеньях, электронно-ламповых генераторов с нагрузкой (в частности, с локационными антеннами) и т. д. Таким образом, т. м. м. могут выполнять самые различные функции. Масштабы применяемости их в технике можно охарактеризовать, например, тем фактом, что в США производство т. м. м. достигло в последнее время 50 млн. штук в год.

Наиболее широкую и распространенную группу из них составляют силовые трансформаторы, обеспечивающие питание различных электрических цепей (около 70% всех т. м. м.). Эта группа т. м. м. рассматривается в книге с наибольшей полнотой. Рассматриваются также отдельные вопросы из области специальных т. м. м. Это — весьма близкие к силовым, однако и специфичные по характеру работы трансформаторы для питания выпрямительных схем заряда емкостных накопителей импульсных генераторов, применяемые в импульсной технике. Это также выходные трансформаторы специальных генераторов, применяемые в гидролокации, технике ультразвука и в ряде других случаев. Подобные трансформаторы часто работают в импульсных режимах. Выходные трансформаторы во многих случаях лишь условно могут быть отнесены к т. м. м., поскольку их мощность в импульсе может достигать больших величин. Однако средняя за период мощность, определяющая габариты и конструкцию трансформатора, как правило, не превышает указанных выше значений.

Перечисленные виды трансформаторов, как трансформаторы малой мощности, имеют много общего в конструкции, что и позволяет рассмотреть их в рамках одной книги. Соответственно главы, посвященные вопросам конструкции, технологии изготовления и применяемым материалам, носят общий характер как для этих, так и других видов т. м. м. (например, импульсных).

Что касается вопросов теории и расчета, то даже силовые т. м. м., при всей общности их теории с теорией мощных силовых трансформаторов, требуют к себе несколько особого подхода в силу целого ряда специфических обстоятельств.

Необходимо отметить, что вопросы теории, конструирования и расчета т. м. м. очень слабо освещены в литературе. Это можно объяснить тем, что т. м. м. относятся к сравнительно молодой и быстро прогрессирующей области трансформаторостроения. Здесь, в частности, особенно быстро внедряются новые магнитные и электроизоляционные материалы, что привело к появлению принципиально новых конструкций т. м. м. и технологии их производства и необходимости разработки новых методик инженерного расчета.

Известную специфику вызывает широкое использование т. м. м. на повышенных частотах — 400 *гц* и выше. Большую роль в определении тенденций развития т. м. м. играет требование снижения их весов и габаритов, поскольку особое распространение эти трансформаторы нашли в областях специальной техники.

С учетом сказанного при изложении материала основное внимание уделено особенностям т. м. м. Общая же теория трансформаторов предполагается известной читателю из курсов электрических машин.

ГЛАВА I

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (Т. М. М.)

Помимо перечисленных во введении, можно указать также такие виды специальных т. м. м., как пиковые, измерительные и различного рода согласовывающие (выходные трансформаторы являются частным случаем последних). Теория и расчет этих видов трансформаторов в книге не рассматриваются. Вопросам проектирования импульсных и пиковых трансформаторов посвящены работы д-ра техн. наук Н. П. Ермолина и д-ра техн. наук Я. С. Ицхоки, согласовывающих трансформаторов — работы д-ра техн. наук Г. С. Цыкина. Не рассматриваются также т. м. м с подмагничиваемым шунтом, разработанные под руководством д-ра техн. наук А. М. Бамдаса. Классификация т. м. м. может быть произведена по ряду признаков.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

По мощности. По величине номинальной мощности (в пределах рассматриваемой категории трансформаторов малой мощности) удобно выделить три группы трансформаторов: малые, средние и большие. Таким образом, термины «большой трансформатор малой мощности» или, что то же, «т. м. м. большой мощности» не должны казаться курьезом.

К малым т. м. м. можно отнести трансформаторы мощностью в единицы и немногие десятки вольт-ампер, к трансформаторам средней мощности — мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен вольт-ампер и к большим т. м. м.— от нескольких сотен до нескольких тысяч вольт-ампер.

По системе тока. Т. м. м. в подавляющем большинстве случаев делают однофазными. Однако в последние годы начинают находить применение также и трехфазные трансформаторы.

По рабочей частоте. Это один из важнейших признаков, характеризующих трансформатор. По частоте питания трансформаторы можно разбить на четыре группы:

нормальной частоты — 50 *гц*,

повышенной частоты — 100—10 000 *гц*,

ультразвуковой частоты — свыше 10 000 *гц*,
высокой частоты — свыше 100 000 *гц*.

Т. м. м. последней группы в книге не рассматриваются

Особое место занимают импульсные трансформаторы, трансформирующие импульсы напряжения и тока определенной формы.

По напряжению. Этот признак характеризует величину наивысшего напряжения, на которое должна быть рассчитана изоляция какой-либо одной, нескольких или всех обмоток трансформатора. По этому признаку т. м. м. можно разделить на низковольтные и высоковольтные. К первым относятся трансформаторы низкого напряжения, у которых рабочее напряжение ни одной из обмоток не превышает 1000—1500 *в*. Говоря о трансформаторах высоковольтных, надо выделить два принципиально различных случая.

В первом случае какие-либо обмотки трансформатора имеют высокое номинальное напряжение (выше 1000—1500 *в*). Это предопределяет необходимость выполнения надежной изоляции между отдельными обмотками трансформатора, между каждой обмоткой и корпусом, а также и слоевой изоляции в самих высоковольтных обмотках.

Во втором случае рабочие напряжения обмоток сами по себе невысоки, но в силу схемных особенностей высокие напряжения существуют между обмотками или по отношению к корпусу. Поскольку в этом случае требуется выполнение высоковольтной изоляции между обмотками или корпусной (или и той и другой), трансформатор следует отнести к высоковольтным. Однако слоевая изоляция здесь будет низковольтной, поэтому подобные трансформаторы рационально выделить как трансформаторы с высоким потенциалом.

Может встретиться и такой случай, когда высокий потенциал на обмотках трансформатора нормально отсутствует, но может возникнуть при каком-либо предусматриваемом аварийном режиме схемы. Подобный трансформатор также необходимо отнести к разряду высоковольтных.

§ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ДРУГИМ ПРИЗНАКАМ

По типу конструкции. Конструктивных особенностей, отличающих различные трансформаторы, может быть очень много. В частности, важным моментом является способ изготовления сердечника, о чем подробно будет сказано в гл. II. Однако основным фактором, определяющим характер конструкции трансформатора, является тип конструкции или, точнее, конфигурация сердечника. Однофазные трансформаторы выполняют броневыми, стержневыми и тороидальными. Сердечники этих трех типов конструкций изображены на рис. 1.

Катушка у броневого трансформатора располагается на среднем стержне. У стержневого трансформатора катушки находятся на обоих стержнях. В отдельных случаях применяются и стержневые трансформаторы с одной катушкой, сидящей на одном из стержней и заполняющей все окно. У тороидального трансформатора обмотки наматываются непосредственно на сердечник равномерно по окружности. Каждый из этих типов трансформаторов имеет свои достоинства и недостатки, определяющие целесообразность их применения. Вопрос этот будет рассмотрен далее.

Сердечник трехфазного трансформатора (см. рис. 1) внешне напоминает броневой сердечник однофазного трансформатора,

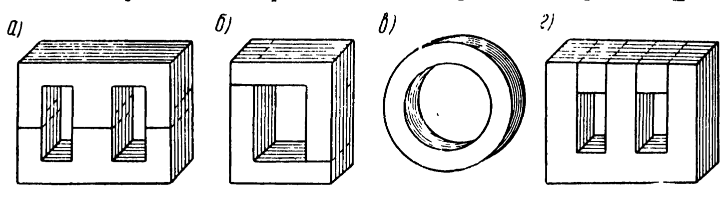


Рис. 1. Сердечники различных типов т. м. м. (наборные из пластин): *а* — броневой (Ш-образный); *б* — стержневой (П-образный); *в* — тороидальный (О-образный); *г* — трехфазный (Е-образный).

однако сходство это чисто формальное. По существу же это сердечник стержневой. Три катушки (три фазы) располагаются здесь каждая на своем стержне. Говоря далее «стержневой трансформатор», мы будем всегда иметь в виду трансформатор однофазный, именуя же стержневой трехфазный трансформатор, слово «стержневой» будем опускать.

По режиму работы. Т. м. м. могут быть продолжительного, кратковременного, повторно-кратковременного режимов работы, а также разового действия. Следует отметить, что среди повторно-кратковременных режимов особое место занимают импульсные режимы работы, когда время паузы во много раз (десятки и сотни) превышает время работы, т. е. продолжительность включения составляет проценты и доли процента. Такие режимы распространены в радио- и гидролокационной технике, причем работа может происходить либо импульсами специальной формы (импульсные трансформаторы), либо на повышенных и ультразвуковых частотах.

При отсутствии оговорок речь всегда будет идти о трансформаторах продолжительного режима, т. е. такого режима работы, когда за один цикл включения трансформатор достигает установившегося теплового состояния.

По областям применения трансформаторы малой мощности также необходимо разграничивать, поскольку для разных усло-

вий устанавливаются различные сроки службы, величины рабочих температур, механической прочности, экономических показателей и т. д. Например, для массовой радиовещательной и телевизионной аппаратуры при малом весе и габаритах требуется возможная дешевизна трансформатора. Расширение экономических связей со странами Африки и Азии потребовало разработки аппаратуры, годной к использованию в тропическом климате с присущими ему высокой влажностью, повышенной температурой и активной микробиологической (грибковой) флорой.

Дальнейший прогресс авиационной техники требует непрерывного повышения теплостойкости аппаратуры вплоть до температур 500—600°. * Бурно развивающиеся области науки и техники по использованию в мирных целях атомной энергии нуждаются в изделиях, выдерживающих интенсивные радиоактивные облучения. Подобные примеры могут быть продолжены и далее.

Не имея возможности привести здесь полную классификацию трансформаторов по рассматриваемым признакам, выделим два важнейших обстоятельства, влияющих как на конструкцию, так и на расчет трансформаторов,— срок службы и температуру окружающей среды (следствием этих факторов является величина допустимого перегрева).

В этом отношении необходимо выделить следующие основные группы т. м. м.: трансформаторы общего применения (гражданская промышленность); трансформаторы авиационной аппаратуры; трансформаторы судовой аппаратуры; трансформаторы наземной аппаратуры специального назначения. Ориентировочные сроки службы и значения температуры окружающей среды для этих групп трансформаторов приведены для обычных условий в табл. 1. В отдельных случаях эти величины могут быть и существенно иными.

Таблица 1

Области применения т. м. м.

Область применения	Срок службы, час.	Наибольшая температура окружающей среды, °C
Бытовая аппаратура	100 000	60
Наземная аппаратура специального назначения	10 000—40 000	50—70
Судовая аппаратура	20 000—10 000	70
Авиационная аппаратура в обычном исполнении	300—500	80
То же в теплостойком исполнении	300—500	150

* Температура по всей книге указывается в градусах Цельсия.

Американские нормы устанавливают для т. м. м. военной аппаратуры три градации по сроку службы: не менее 10 000 час., не менее 2500 час., 500 час. и менее с конкретным указанием срока.

ГЛАВА II

КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

§ 3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ

Основу любого трансформатора составляют магнитные и электрические цепи, т. е. сердечник (магнитопровод) и катушки. Неизбежными элементами его являются также конструктивные детали, служащие для крепления сердечника и установки трансформаторов в блоках аппаратуры, и выводы катушек. В высоковольтных трансформаторах, в зависимости от способа выполнения изоляции, может появляться и дополнительный элемент — металлический бак (корпус). Особенности конструкций т. м. м. рассмотрим по их отдельным элементам.

Сердечники. Сердечники мощных трансформаторов набирают (шихтуют) из отдельных прямоугольных пластин трансформаторной стали. Для т. м. м. этим способом изготовляют сердечники редко — только для больших трансформаторов. В большинстве случаев применяют принципиально отличные конструкции — либо наборные сердечники из штампованных пластин, называемые в дальнейшем для простоты наборными штампованными сердечниками, либо ленточные сердечники. Штампованные сердечники утвердились в практике относительно давно. Ленточные сердечники появились лишь в последние годы, благодаря своим преимуществам они широко входят в жизнь. Для т. м. м. высокой частоты и импульсных находят применение прессованные сердечники из специальных материалов.

Важным техническим показателем для сердечника является степень использования его полного сечения чисто активным магнитопроводящим материалом, т. е. коэффициент заполнения сердечника $к_с$.

Н а б о р н ы е   ш т а м п о в а н н ы е   с е р д е ч н и к и. Подобный сердечник шихтуется из пластин той или иной конфигурации, в зависимости от типа набираемого сердечника — броневого, стержневого, тороидального или трехфазного.

На рис. 1 были показаны такие сердечники. Преимуществом их перед собранными из отдельных прямоугольных пластин является уменьшение числа стыков или перекрытий пластин, т. е.

повышение качества сердечника, а также возможность применения прогрессивной технологии — штамповки вместо резки листов на пластины. Однако с ростом мощности, т. е. размеров трансформатора, штампы становятся громоздкими и значительно удорожаются. Кроме того, применяемость унифицированных по размерам сердечников с ростом мощности снижается. В силу этих причин при мощностях свыше нескольких сот вольт-ампер (на частоте 50 *гц*) применение штамповки становится экономически неоправданным.

Возможна различная сборка штампованных броневых и стержневых сердечников — в стык или вперекрышку (рис. 2).

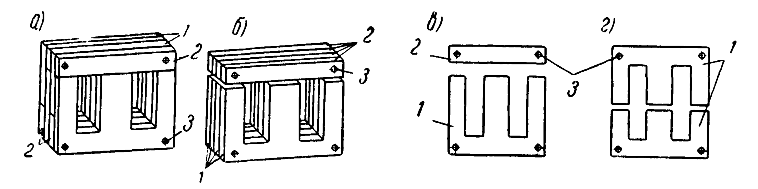


Рис. 2. Виды штампованных пластин сердечников и их сборки: *а, б* — пластины с нормальным ярмом; *в, г* — пластины с уширенным ярмом; *а* — сборка вперекрышку; *б* — сборка в стык; *в* — разъем по ярму; *г* — разъем по стержню.

1 — Ш-образные пластины, *2* — замыкающие; *3* — отверстия под шпильки.

Второй способ предпочтителен, ибо при его использовании отсутствуют непосредственные зазоры в магнитной цепи. Сами пластины также могут быть различной формы — с линией разъема по стержню или по границе между стержнем и ярмом. Пластины тороидальных сердечников представляют собой замкнутые кольца. Пластины для броневых сердечников часто называют Ш-образными, ибо их форма напоминает букву Ш, пластины для стержневых трансформаторов — П-образными, для тороидальных трансформаторов — О-образными, для трехфазных трансформаторов — Е-образными. Так же называют и сердечники. Ярма у Ш-, П- и Е-образных пластин могут быть либо нормальными, когда индукция в стержне и ярме одинакова, либо уширенными, когда индукция в ярме меньше, чем в стержне, благодаря чему общее магнитное сопротивление магнитного пути уменьшается. В первом случае ширина ярма у П- и Е-образных пластин равна ширине стержня, а у Ш-образных пластин — половине ширины стержня, ибо здесь по ярму проходит лишь половина общего магнитного потока, создаваемого катушкой (у Ш-образных пластин ярмом являются и крайние стержни, не несущие обмоток). Во втором случае ширина ярм увеличивается на 15—25% от нормальной ширины. У О-образных пластин ярмо отсутствует.

В отечественной технике из наборных штампованных сердечников наибольшее распространение получили броневые. При

этом для трансформаторов наименьшего веса обычно применяют пластины с нормальным ярмом по междуведомственной нормали НО.777.000; для трансформаторов наименьшей стоимости при частоте питания 50 *гц* — пластины с уширенным ярмом по нормали НИО. 777.001, заменившие применявшиеся ранее пластины с нормальным ярмом по нормали СТ-360А. Размеры пластин по всем этим нормалям позволяют осуществить такой раскрой заготовки, при котором после штамповки не остается никаких отходов. Поэтому пластины получили название «пластин безотходной штамповки».

Стяжка отдельных пластин в единый пакет осуществляется либо изолированными стяжными шпильками, пропускаемыми

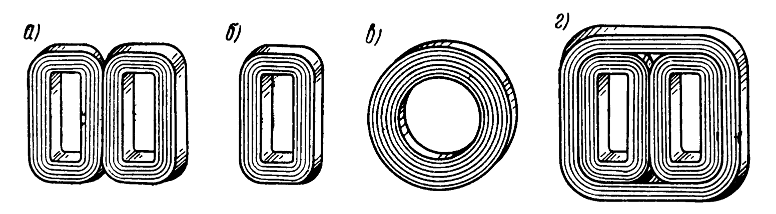


Рис. 3. Замкнутые ленточные сердечники: *а* — броневой; *б* — стержневой; *в* — тороидальный; *г* — трехфазный.

через выштампованные в пластинах отверстия (см. рис. 2), либо наружными элементами, служащими иногда одновременно для крепления трансформатора к шасси (см. рис. 23, 24).

Ленточные сердечники. Ленточные сердечники изготовляют из узкой ленты электротехнической стали или специального сплава той или иной толщины. Ленточные сердечники могут использоваться в виде броневых, стержневых, тороидальных и трехфазных. По аналогии со штампованными наборными сердечниками они могут быть названы соответственно Ш-, П-, О-, Е-образными. При этом каждый из них в принципе может быть как замкнутым, так и разъемным.

Замкнутые ленточные сердечники легко получаются путем навивки ленты на металлических оправках требуемых размеров. Тороидальные сердечники навиваются на круглую оправку, остальные — на прямоугольную. Броневой сердечник получается сдваиванием одинаковых стержневых. Для получения трехфазного сердечника сдвоенные стержневые сердечники дополнительно охватываются по наружному контуру ленточным ярмом той же ширины, что и стержень стержневого сердечника.

Замкнутые ленточные сердечники всех типов показаны на рис. 3. Достоинством замкнутых сердечников является высокое качество магнитопровода, обеспечивающего малое магнитное сопротивление потоку, проходящему вдоль лент сердечника.

Использование замкнутых сердечников встречает, однако, серьезные затруднения, вызванные необходимостью вматывать в них катушки, что малопроизводительно и нетехнологично. Поэтому и появились разъемные сердечники. Разъемные сердеч-

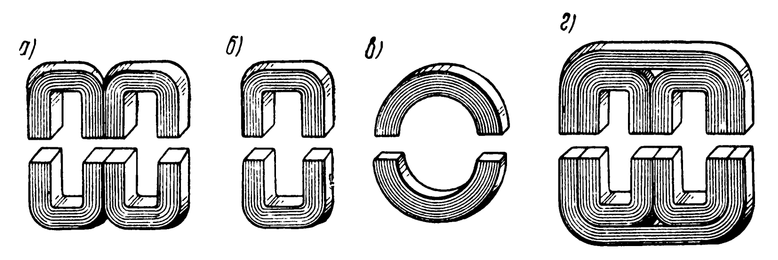


Рис. 4. Разъемные ленточные сердечники: *а* — броневой (Ш-образный), *б* — стержневой (П-образный); *в* — тороидальный (О-образный); *г* — трехфазный (Е-образный).

ники могут быть получены путем резки навитых замкнутых сердечников на две половины. Возможно также непосредственное изготовление каждой половинки (полусердечника) отдельно. Разъемные сердечники всех типов показаны на рис. 4. Цельные половинки разъемных ленточных сердечников иногда называют С-образными или U-образными сердечниками. Разъемная кон-

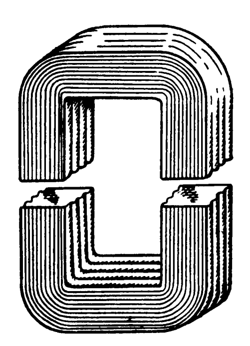


Рис. 5. Сердечник из гофрированной ленты.

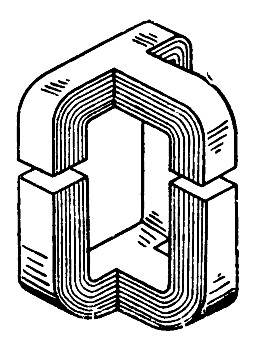


Рис. 6. Трехфазный разъемный ленточный сердечник особой конструкции.

струкция сердечника позволяет наматывать катушки трансформатора отдельно и вставлять затем в них заготовленные полусердечники. Однако при этом в магнитную цепь вводится неизбежный воздушный зазор.

В США и ФРГ находят применение желобчатые сердечники, изготовленные из гофрированной ленты (рис. 5). Используя свойство ломаной линии, незначительным увеличением ширины

стержня можно существенно увеличить поверхность охлаждения сердечника, что важно при повышенных частотах. Подобные сердечники обладают, кроме того, большей жесткостью. На рис. 6 показана своеобразная конструкция трехфазного составного сердечника, нашедшая применение в США.

Кроме рассмотренных, возможны и другие модификации ленточных сердечников (см. ниже).

Монолитность ленточных сердечников, их механическая прочность обеспечиваются различными путями при помощи лаков или клеящих эмалей. Стяжка половинок разъемных ленточных сердечников в единую конструкцию осуществляется при сборке трансформатора (см. § 4).

Прессованные сердечники. Прессованные сердечники изготовляют из порошковых материалов. Прессовать можно как цельные сердечники, так и их отдельные половинки. Прессованные сердечники могут быть всех рассмотренных типов.

Катушки. Конструкцию катушек определяют три основных фактора: способ укладки, размещения каждой обмотки трансформатора; взаиморасположение отдельных обмоток; способ выполнения изоляции. Определенную роль при этом играет также и вид проводника обмоток.

Важным техническим показателем для катушки является степень использования ее активным материалом окна сердечника, т. е. коэффициент заполнения окна $k_{ок}$.

Проводники обмоток. В большинстве случаев в т. м. м. применяют медные провода, поставляемые кабельной промышленностью с готовой витковой изоляцией провода. Провода, как правило, круглые. При больших сечениях могут применяться и провода прямоугольного сечения. В отдельных случаях, например для трансформаторов ультразвуковой частоты с большими токами или для накальных трансформаторов с особенно большими токами, приходится применять неизолированную медную ленту соответствующей толщины. Иногда применяется также тонкая медная фольга как для экранов между обмотками, так и для самих обмоток. Во всех этих случаях витковая изоляция (обычно волокнистые материалы) накладывается заблаговременно или в процессе намотки катушек. Марка провода или вид накладываемой изоляции выбирается в зависимости от условий работы трансформатора и предъявляемых к нему требований надежности (см. § 6 и 7).

Большой интерес проявляется в последние годы к алюминию, как весьма перспективному проводниковому материалу для т. м. м При этом алюминий целесообразно применять только в виде фольги, но не в виде обычных проводников (см. § 18). Витковая изоляция на алюминиевую фольгу наносится перед изготовлением катушек.

Работы по использованию алюминия в т. м. м. ведутся бы-

стрыми темпами и можно ожидать появления подобных «алюминиевых» трансформаторов в самое ближайшее время.

Конструкции отдельных обмоток. Существуют два принципиально различных способа выполнения обмоток т. м. м. Наиболее распространенный способ — это многослойная обмотка, непрерывно наматываемая до получения заданного числа витков и располагаемая вдоль всей длины стержня магнитопровода (или его части, отведенной для данной обмотки) Такие обмотки назовем цельными.

Разновидностью цельной обмотки является секционированная обмотка; обмотка при этом разбивается на ряд секций, каждая из которых занимает часть длины стержня, но все вместе они составляют единое конструктивное целое. Каждая секция

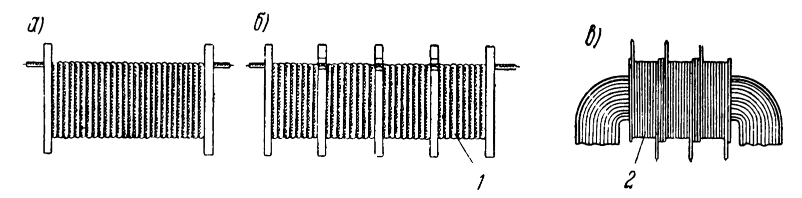


Рис. 7. Виды обмоток т м. м по способу выполнения: *а* — цельная обычная обмотка; *б* — цельная секционированная обмотка; *в* — галетная обмотка.

1 — секция; *2* — галета.

выполняется обычным образом, между собой секции соединяются последовательно или параллельно. Секционирование применяется обычно для высоковольтных обмоток. В этом случае секции друг от друга надежно изолируются.

Второй способ, практически разработанный в СССР под руководством А. Л. Харинского,— это выполнение обмотки в виде совокупности отдельных элементов, галет, каждая из которых представляет собой полностью законченную конструктивную деталь. Галеты нанизываются на стержень магнитопровода одна за другой по всей его высоте и соединяются между собой электрически тем или иным образом. Отдельные галеты могут изготовляться совершенно независимо одна от другой. Подобные обмотки получили название галетных обмоток.

Цельные и галетная обмотки изображены на рис. 7. По имени обмоток название галетных получили и сами трансформаторы, в которых использованы такие обмотки. Галетные обмотки нашли применение в низковольтных трансформаторах. Их можно применять для всех типов трансформаторов — БТ, СТ, ТТ, ЗТ. Преимуществом галетных трансформаторов является высокая степень унификации галет. Путем комбинации их последовательно-параллельных соединений можно получать разнообразные электрические параметры обмоток по токам и напряжениям.

Особенно перспективными становятся галетные трансформаторы с применением для обмоток алюминиевой фольги: галета — наиболее приемлемая форма для выполнения таких обмоток.

Взаиморасположение обмоток. Как и для мощных трансформаторов, для г. м. м. применяют два основных вида обмоток по их взаиморасположению — концентрические и чередующиеся обмотки. Концентрические обмотки располагаются одна внутри другой (рис. 8). Чередующиеся обмотки разбиваются на отдельные части, причем части разных обмоток располагаются вдоль стержня одна за другой, занимая всю ширину окна каждая и непрерывно чередуясь.

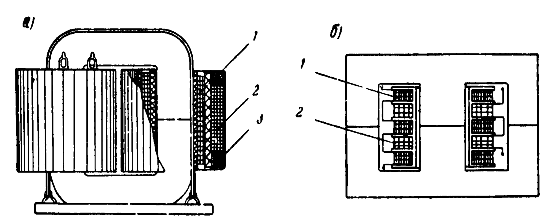


Рис. 8. Виды обмоток т. м. м. по их взаиморасположению: *а* — концентрические; *б* — чередующиеся.
1 — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка; *3* — изоляционный буртик.

Чередующиеся обмотки более сложны, но обладают меньшим рассеянием. Поэтому они могут применяться для выходных, импульсных трансформаторов и в других специальных случаях. Для силовых же т. м. м., у которых рассеяние не играет сколько-нибудь существенной роли (см. § 13), такое расположение обмоток не применяется. Однако по этой причине для силовых т. м. м. возможны такие варианты взаиморасположения обмоток, которые недопустимы для мощных трансформаторов из-за увеличенного рассеяния. Первый из этих вариантов является в какой-то мере частным случаем чередующихся обмоток: обмотки располагаются рядом вдоль магнитопровода, но не чередуются. Такое расположение может быть удобным для высоковольтных трансформаторов, особенно при большом числе вторичных обмоток (рис. 9). Подобные обмотки назовем разделенными обмотками.

Второй вариант является частным случаем концентрических обмоток и может применяться при наличии двух и более вторичных обмоток. В этом варианте каждая вторичная обмотка располагается концентрически по отношению к первичной, но занимает лишь часть ее длины и по длине стержня расположена рядом с другой вторичной обмоткой. Подобные обмотки назовем неполноконцентрическими. Неполноконцентрическими являются, в частности, обмотки галетных трансформаторов.

Выбор взаиморасположения обмоток производится при проектировании трансформатора расчетчиком и конструктором в зависимости от требований по рассеянию трансформатора и с учетом удобства конструктивного размещения обмоток.

Изоляция. О витковой изоляции проводников говорилось выше. Здесь, раздельно для низковольтных и высоковольтных трансформаторов, рассмотрим выполнение корпусной, слоевой и межобмоточной изоляции катушек.

Изоляция катушек низковольтных трансформаторов. Корпусная изоляция осуществляется при помощи изоляционных каркасов либо без них, с помощью изоляционных гильз или слоя лака (рис. 10, 27). Соответственно и конструкция катушек называется каркасной или бескаркасной. Каждая из этих конструкций имеет свои достоинства. Как правило, каркасная конструкция более надежна в эксплуатации, бескаркасная же конструкция технологичнее в массовом производстве (см. § 12). Каркас или гильза, выполняя функции корпусной изоляции, является одновременно той основой, на которой покоятся обмотки.

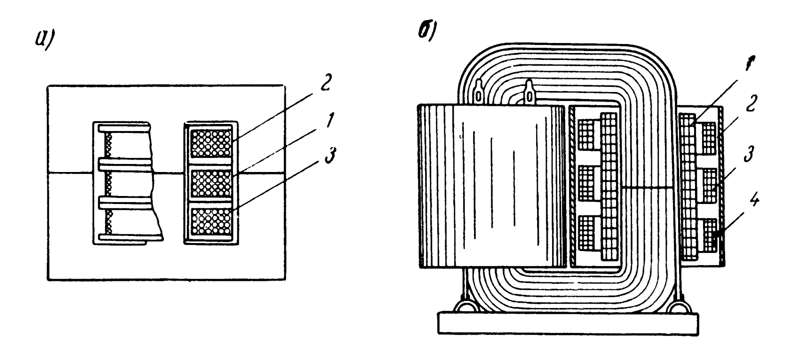


Рис. 9. Разновидности обмоток т. м. м. по их взаиморасположению: *а* — разделенные обмотки; *б* — неполноконцентрические обмотки.

1 — первичная обмотка; *2, 3, 4* — вторичные обмотки.

Каркасы могут быть цельными или сборными из отдельных деталей — боковых стенок и щек. Сборные каркасы (рис. 11) изготовляют из электротехнического картона, текстолита, гетинакса толщиной 1—1,5 *мм*. Отдельные детали склеивают или сочленяют при помощи замков. Щели, неизбежно остающиеся по углам сочленяемых деталей, до намотки катушек перекрывают изоляционной бумагой или тканью.

В последние годы находят все более широкое применение цельные прессованные или литые каркасы (рис. 12). Они обладают лучшими механическими и электрическими свойствами и дешевле в крупносерийном производстве. Толщина стенок таких

каркасов в малых размерах может быть уменьшена до 0,3—0,5 *мм*. Прессовку и литье каркасов производят из пресс-порошков и других прессовочных и литьевых материалов. Прессованные и литые каркасы можно делать и по частям с последующей сборкой их в единую конструкцию.

Гильза выполняется из электротехнического картона, изоляционных бумаг и т. п. По краям гильзы из тех же материалов накладывают буртики для изоляции обмоток от ярма сердечника (см. рис. 10). Необходимость в буртиках может быть исключена, если для заделки торцов катушек применять специальные изоляционные пасты.

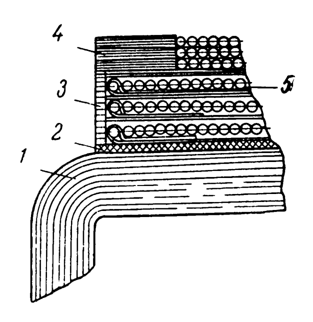


Рис. 10. Бескаркасная катушка т. м. м.
1 — сердечник; *2* — изоляционная гильза; *3* — изоляционный буртик (от ярма); *4* — то же (межобмоточный); *5* — слоевая изоляция.

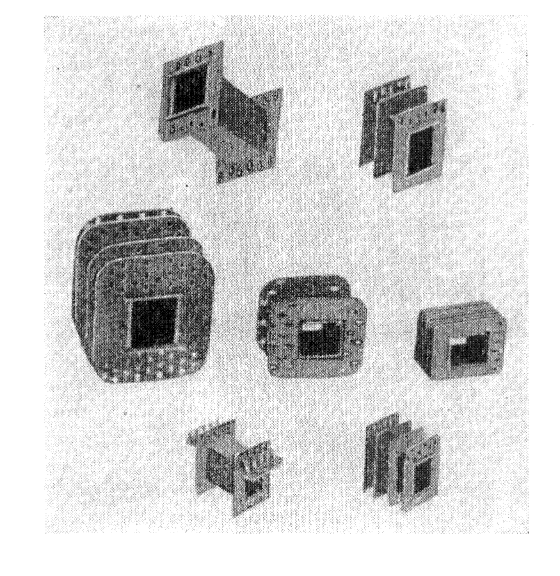


Рис. 11. Сборные каркасы для катушек т. м. м.

Слоевая изоляция прокладывается при намотке катушек либо через каждый слой, либо через несколько слоев. Через каждый слой изоляция прокладывается в случае применения провода с низкокачественной витковой изоляцией (см. § 7), при диаметрах провода свыше 0,4—0,5 *мм*, или в особо ответственных случаях. Прокладку через несколько слоев применяют при намотке катушек проводами с высокопрочной эмалью или при наличии дополнительной наружной оплетки, причем суммарное напряжение в неизолированных слоях составляет 20—30% от электропрочности витковой изоляции провода.

В качестве слоевой изоляции используют изоляционные материалы толщиной в несколько сотых долей миллиметра — бумаги, тканевые материалы, синтетические пленки. В тороидальных трансформаторах применение бумаг затруднительно из-за

их недостаточной механической прочности и эластичности и плохой пропитываемости. Выбор материала определяется рабочей температурой трансформатора, условиями пропитки, требуемой надежностью, а число слоев изоляции — испытательным напряжением между слоями.

Обычно изоляция укладывается в один слой. У краев слоя изоляция иногда подворачивается таким образом, чтобы не

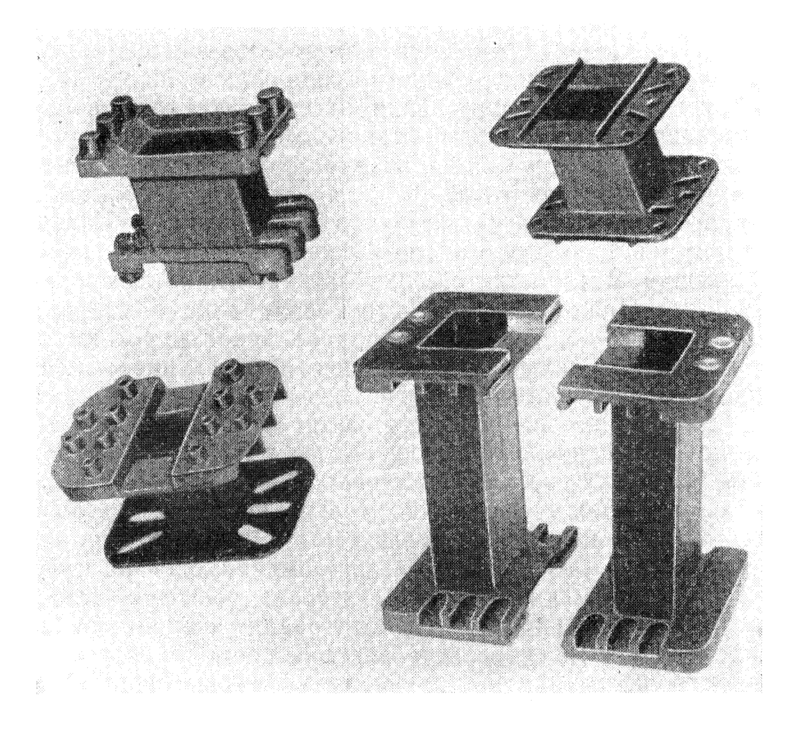


Рис. 12. Литые и прессованные каркасы для катушек т. м. м.

могло произойти западания витков из слоя в слой, как это показано на рис. 10. С той же целью применяют подклейку витков провода. При намотке на каркас каждый слой укладывают вдоль всей длины (высоты) каркаса. При бескаркасной намотке во избежание сползания витков намотанные слои скрепляют нитками, причем каждый верхний слой делается обычно несколько короче низлежащего.

У галетных обмоток напряжение внутри галеты достаточно мало, что позволяет обойтись совсем без слоевой изоляции. В случае применения для обмоток ленты или фольги, занимающих всю высоту окна трансформатора или отдельной галеты,

понятия витковой и слоевой изоляции сливаются между собою.

Межобмоточная изоляция принципиально выполняется так же, как слоевая, но укладывается обычно в несколько слоев, число которых зависит от испытательного напряжения между обмотками. Во избежание пробоя по поверхности корпусной изоляции края соседних обмоток часто смещают относительно друг друга, заполняя свободное пространство буртиком из изоляционного материала (см. рис. 8, 10, 27). У галетных трансформаторов изоляция между первичной обмоткой и галетами вторичных обмоток, а также между отдельными галетами осуществляется слоем лака или компаунда.

Изготовленную катушку (или намотанный трансформатор) пропитывают изоляционными лаками или компаундами. Пропитка преследует цель заполнить все поры в изоляции и между проводниками, вытеснить из катушек воздух и тем самым повысить влагостойкость, а также теплопроводность катушек. Пропитка повышает нагревостойкость изоляционных бумаг, цементирует катушки. В малоответственных случаях пропитка может отсутствовать. При повышенных требованиях по влагостойкости торцы катушек, во избежание проникновения через них влаги внутрь катушек, целесообразно заделывать специальными изоляционными замазками (пастами). С той же целью катушки покрывают специальными покровными составами.

Изоляция катушек высоковольтных трансформаторов. Надежная изоляция катушек высоковольтных трансформаторов представляет сложную задачу. Долгое время эта задача решалась путем применения трансформаторного масла или термопластичных (например, битумных) компаундов. При напряжениях до 3—5 *кв* можно применять и сухие трансформаторы, высоковольтные обмотки которых, как правило, секционированы.

Конструкция масляных т. м. м. повторяет в миниатюре конструкцию мощного масляного трансформатора без радиаторов: обмотки при помощи изоляционных распорок отделены от сердечника и друг от друга и помещены в бак с маслом, которое играет роль корпусной и межобмоточной изоляции. Бак желательно иметь герметичным во избежание утечки, увлажнения и загрязнения масла. Изоляторы закрепляют на крышке бака В последнее время некоторое применение нашли литые баки из дюралюминия. Масляным трансформаторам присущи серьезные недостатки — большие габариты, пожароопасность, трудность надежной герметизации и контроля качества масла в условиях работы специальной аппаратуры и, как следствие, недостаточная надежность в работе. Много недостатков и у трансформаторов, бачки которых заполнены пластичными компаундами. За границей разработаны трансформаторы с наполнением баков инертными газами, свободные от многих из этих недостатков.

Однако радикальное улучшение конструкции произошло в последние годы, когда на смену масляным пришли сухие трансформаторы с изоляцией на основе термореактивных смол, т. е. смол, затвердевающих необратимо и не расплавляющихся при повышенных температурах. Выдающимися электроизоляционными, влагозащитными и механическими свойствами обладают компаунды на основе высокомолекулярных органических материалов — эпоксидных смол. Высокими свойствами обладают и полиэфирные компаунды. Переход к таким конструкциям дает, помимо прочих преимуществ, уменьшение веса в 1,2—3 раза и более, а также снижение трудоемкости изготовления в 1,5—3 раза. В дальнейшем из высоковольтных рассматриваются только сухие трансформаторы.

Возможны два принципиально различных способа изоляции катушек с помощью термореактивных компаундов — способ обволакивания и способ заливки в форму (метод опрессовки как менее распространенный не рассматривается). Способ обволакивания применяют при относительно невысоких рабочих напряжениях — до 7—10 *кв*. Катушка выполняется так же, как и бескаркасная низковольтная. Во избежание западания витков каждый последующий слой часто делают короче низлежащего. Для корпусной и слоевой изоляции применяют бумаги или стеклоткань. Катушка тщательно пропитывается, а затем обволакивается снаружи слоем компаунда. Толщина слоя составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров и зависит от времени и числа погружений. Такая катушка достаточно надежно изолирована от корпуса и защищена от воздействия влаги воздуха. Этот способ безусловно целесообразен для трансформаторов с малым сроком службы (500—1000 час.), возможность его использования при изготовлении т. м. м. с большим сроком службы требует дополнительного исследования.

Способ заливки является наиболее надежным и качественным способом выполнения сухой высоковольтной изоляции, но он сложнее предыдущего.

Подготовленная катушка устанавливается в специальную заливочную форму необходимых размеров и конфигурации и в этой форме заливается жидким компаундом, заполняющим все пустоты в форме. В результате последующего проведения определенного термического режима компаунды твердеют, приобретают механическую прочность и обеспечивают необходимую электрическую изоляцию между отдельными частями трансформатора. По окончании режима залитая катушка извлекается из формы.

Рассмотрим, как должна быть подготовлена к заливке высоковольтная катушка и как она конструктивно выполняется. Возможные варианты весьма разнообразны. Как слоевую и межобмоточную, так и корпусную изоляцию в принципе можно выпол-

нять либо при помощи изоляционных бумаг и стеклоткани, либо при помощи твердых прокладок из различных изоляционных материалов и слоя заливочного компаунда, заполняющего при заливке специально созданные прокладками воздушные каналы между частями катушки и между катушкой и стенками формы

Возможно как применение одного из этих вариантов, так и комбинация их обоих. Необходимо, однако, иметь в виду, что не все твердые материалы с равным успехом сочетаются с заливочными компаундами. Следует обращать внимание на величины коэффициентов линейного расширения (к. л. р.) материалов в сопоставлении с их значениями у компаундов, так как чем больше отличие этих величин, тем вероятнее опасность появления трещин в конструкции после заливки. Важное значение в этом отношении имеет и выбор соответствующей конфигурации прокладок. Кроме того, залитая конструкция не должна иметь острых углов. Радиусы закругления должны составлять не менее 1,5—3 *мм*. Из различных конструктивных типов менее подвержен растрескиванию залитый тороидальный трансформатор.

Во всех случаях, когда в конструкции используются бумаги или стеклоткань, катушка до заливки компаундом предварительно подвергается вакуумной пропитке также термореактивным компаундом.

Из различных бумаг наилучшей пропиточной способностью обладают микалентная, пропиточная и крепированная. С этой точки зрения их применение предпочтительно, хотя они и обладают меньшей механической прочностью, чем другие сорта изоляционных бумаг (в первую очередь это относится к микалентной бумаге). Особенно желательно применение хорошо пропитываемых бумаг для изоляции катушек тороидальных трансформаторов, у которых пропитка не может осуществляться через торцы катушек, как у броневых и стержневых трансформаторов. Хорошо пропитывается также стеклоткань.

Для создания твердых прокладок можно использовать такие материалы, как термопластичные и термореактивные пластмассы, теплостойкое органическое стекло, в отдельных случаях высококачественный гетинакс. Прокладки можно отливать также предварительно в формах из того же компаунда, который предусмотрен для заливки. Последний способ является наилучшим с точки зрения качества заливки (адгезии компаунда к прокладкам и соответствия величин к. л. р.). Практически наиболее удобно корпусную и межобмоточную изоляцию создавать слоем компаунда, а слоевую — бумагой (стеклотканью). Однако при очень больших напряжениях между слоями (несколько киловольт) часто приходится и слоевую изоляцию обеспечивать слоем компаунда. При этом бывает целесообразным и секционирование высоковольтной обмотки.

Рис. 13. Каркасы для сердечников и межслоевые прокладки для высоковольтных залитых тороидальных трансформаторов.

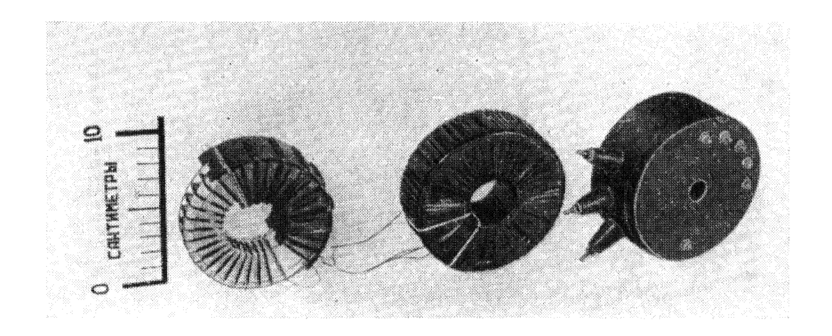


Рис. 14. Высоковольтный залитый тороидальный трансформатор в процессе изготовления. Первичная обмотка секционирована, слоевая изоляция отсутствует. Фиксация межобмоточного расстояния прессованной прокладкой.

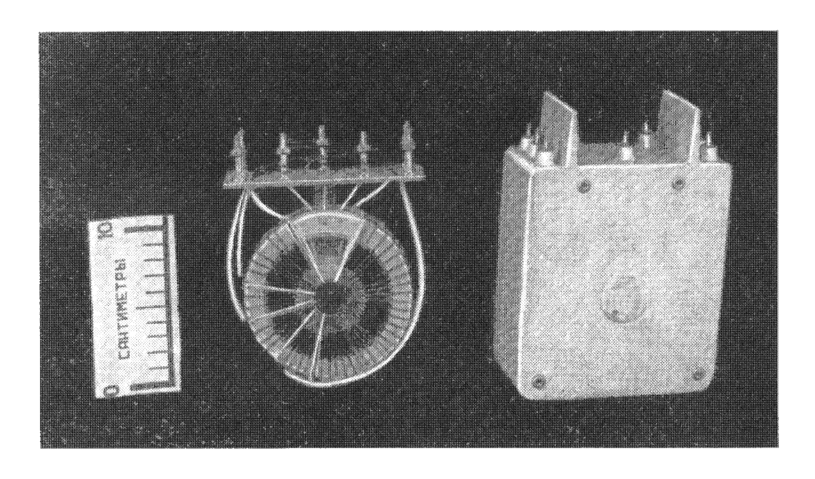


Рис. 15. Высоковольтный тороидальный трансформатор. Фиксация расстояний между слоями и между обмотками литыми кольцами Г-образной формы сечения.

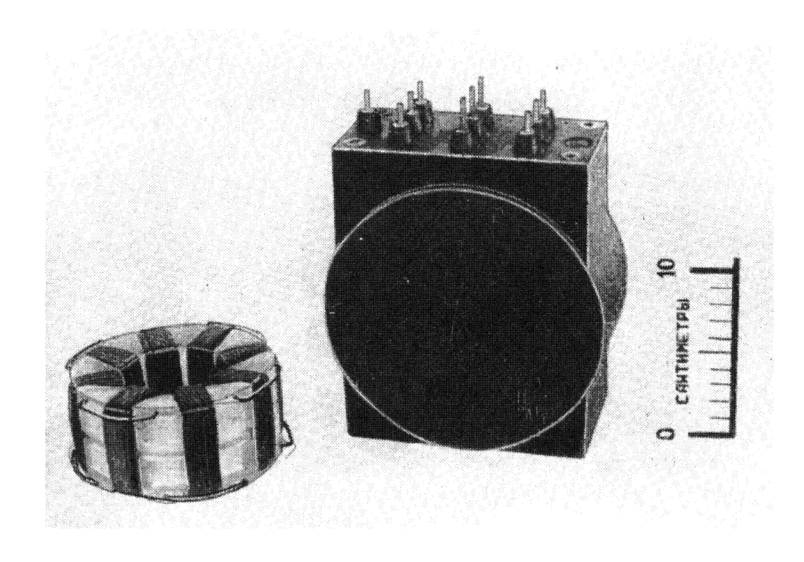


Рис. 16. Высоковольтный залитый тороидальный трансформатор с секционированной первичной обмоткой. Слоевая и межобмоточная изоляция — бумагой.

При конструировании высоковольтных трансформаторов на замкнутых ленточных сердечниках, в частности, тороидальных, приходится предусматривать каркас, являющийся основой катушек и предохраняющий сердечник от воздействия заливочной массы. Каркас можно изготовлять из тех же материалов, что и твердые прокладки. Электрическая прочность его стенок должна быть рассчитана на напряжение внутреннего слоя обмотки,

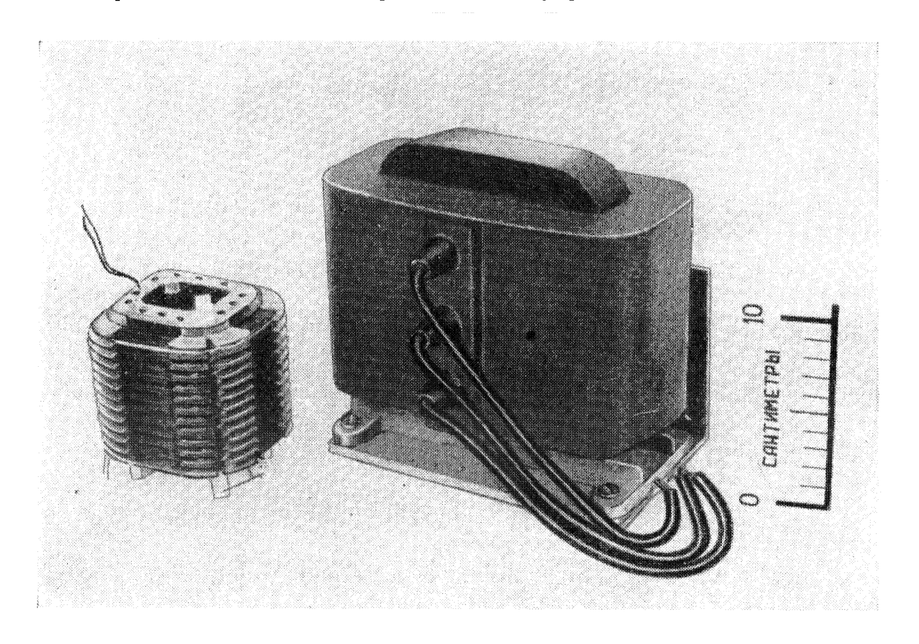


Рис. 17. Высоковольтный залитый стержневой трансформатор с секционированной обмоткой на специальном каркасе. Слоевая изоляция отсутствует

а в случае секционированной внутренней обмотки — на ее полное напряжение. Амортизация сердечника в каркасах обеспечивается заполнением специальным компаундом, прокладками или бандажированием.

При нескольких вторичных обмотках и отсутствии жестких требований по рассеянию удобно применять неполноконцентрические или разделенные обмотки (см. рис. 9). Особенно удобно это для трансформаторов с высоким потенциалом, например накальных.

Различные способы конструктивного выполнения высоковольтных катушек, предназначенных для заливки термореактивным компаундом, показаны на рис. 13—19.

В настоящее время высоковольтные трансформаторы с подобной изоляцией разработаны на напряжения до 20—30 *кв*

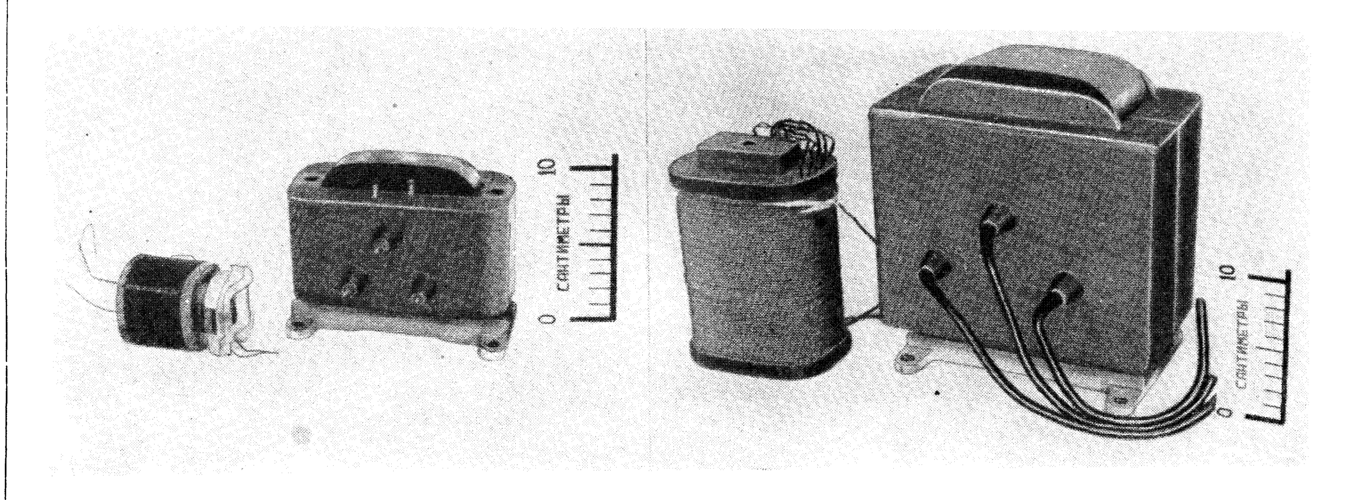


Рис. 18. Высоковольтные залитые стержневые трансформаторы с катушками на специальных каркасах. Межобмоточная изоляция — компаундом. Слоевая изоляция — бумагой.

(рабочие), а высокопотенциальные трансформаторы — на постоянное напряжение до 100 *кв*.

Необходимо отметить, что в т. м. м. при напряжениях в несколько киловольт возможно возникновение короны — ионизация воздушных включений внутри катушки или промежутков между изоляцией и заземленными близрасположенными элементами, в частности магнитопроводом трансформатора (особенно в местах его заострений). Корона приводит к постепенному разрушению изоляции. Особенно благоприятны условия для разви-

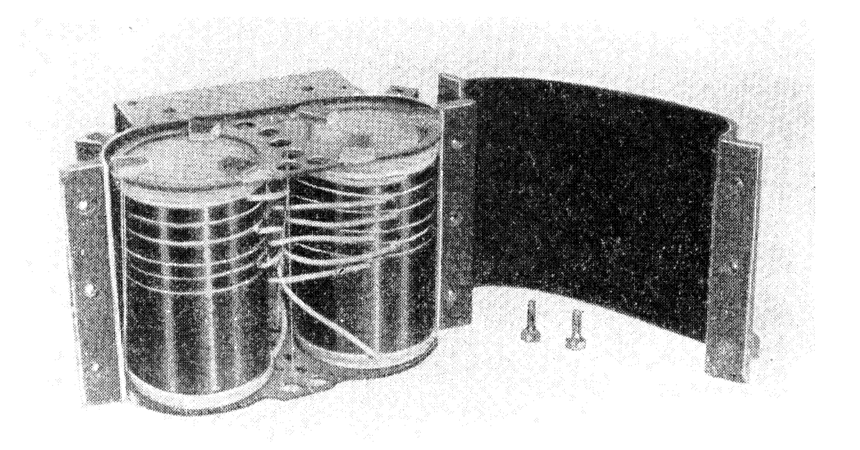


Рис. 19. Катушки высоковольтного стержневого трансформатора, подготовленные в форме к заливке эпоксидным компаундом.

тия короны на высоте, при разреженной атмосфере. Коронирование усиливается с повышением частоты питания, особенно в ультразвуковом диапазоне частот. Менее подвержены коронированию трансформаторы с высоким потенциалом.

Для борьбы с наружным коронированием поверхность катушек покрывается тонким заземленным полупроводящим или проводящим слоем. Это способствует выравниванию электрического поля в зазорах и ликвидации короны. Во избежание образования короткозамкнутого витка вокруг сердечника противокоронирующий слой выполняют с разъемом (рис. 20). Для выравнивания поля у краев слоя принимают определенные меры Вместо покрытий возможно также применение фольговых или сеточных экранов, заливаемых вместе с катушкой, а также тщательная заделка всех щелей изоляционными составами. Внутренняя ионизация в катушках может быть предотвращена лишь правильным конструированием и строгим выполнением необходимых технологических требований, в частности тщательнейшей пропиткой.

При длительном развитии внутренней ионизации, а также при аварийных режимах у катушек, залитых термореактивными компаундами, возможно разложение компаунда, сопровождающееся иногда опасными разрывами катушек. Для ослабления силы разрыва целесообразно применять для заливки эластичные компаунды, а также создавать по поверхности заливаемой катушки барьер из пропитанной компаундом стеклоткани.

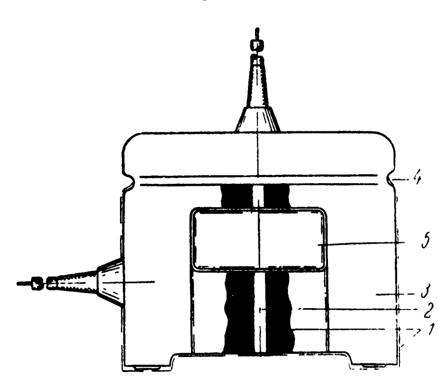


Рис. 20. Противокоронирующее покрытие высоковольтной сухой залитой катушки.

1 — противокоронирующий слой; 2 — его разъем; 3 — катушка; 4 — канавка, заливаемая изоляционной массой, для выравнивания поля у краев слоя; 5 — сердечник.

Следует сказать, что ввиду необходимости обеспечения малых габаритов сухих высоковольтных т. м. м. их конструирование представляет сложную инженерную задачу и встречает большие трудности. Эти трудности усугубляются новизной вопроса, недостаточной изученностью свойств заливочных компаундов, технологическими сложностями. Тем не менее совместными трудами конструкторов, химиков, технологов и электриков задача эта уверенно решается, накапливается необходимый опыт, и такие трансформаторы все шире внедряются в практику трансформаторостроения.

Выводы катушек. Соединение обмотки с собственно выводом можно осуществлять либо тем же проводом, которым намотана катушка, либо специальным припаиваемым проводом. Эти выводные концы заключаются в изоляционные трубки, а у литых высоковольтных катушек изолируются бумагой или тканью. Сами выводы у низковольтных трансформаторов делаются как в виде специальных изоляторов, например прессованных (см. рис. 24), так и в виде штампованных лепестков. Лепестки требуют меньше места и их применение позволяет сократить габариты трансформаторов. Поэтому такой способ нашел в последние годы преимущественное распространение в специальном приборостроении. Лепестки можно заделать путем бандажирования под наружную изоляцию катушек (рис. 31), либо развальцевать или армировать в специальных гнездах прессованных каркасов или плат (см. рис. 28). У трансформаторов радиотехнической аппаратуры выводы очень часто располагают снизу для осуществления нижнего монтажа приборов. У галетных катушек выводы, армированные в приклеиваемых к галетам контактных колодочках, находятся на боковой поверхности катушек (см. рис. 28).

Особую сложность составляет проблема выводов у высоковольтных трансформаторов. Расстояние между открытыми выводами и между выводом и корпусом необходимо обеспечивать из расчета не менее 2 *мм* на киловольт испытательного напряжения по воздуху и 3 *мм* на киловольт по поверхности.

У масляных трансформаторов выводы выполняются обычно в виде фарфоровых изоляторов. Герметизация выводов (как и

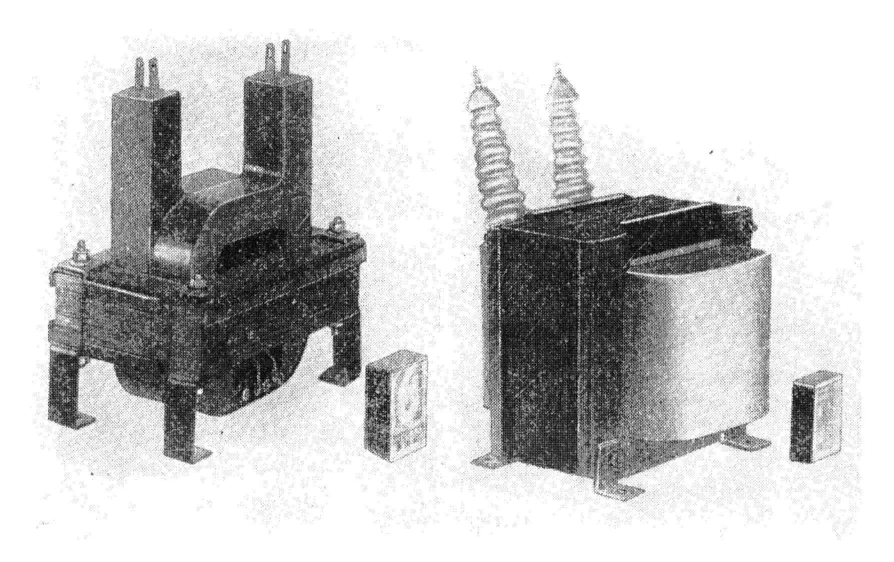


Рис. 21. Сухие высоковольтный и высокопотенциальный трансформаторы на высокое напряжение с протяженными выводами.

бака) обеспечивается или их пайкой в крышке или путем резиновых уплотнений.

У трансформаторов с литой термореактивной изоляцией выводы можно делать высоковольтными гибкими проводами, непосредственно «влитыми» в основную изоляцию катушек (см. рис. 17, 18). Однако не все такие провода имеют адгезию к компаундам. Поэтому в ряде случаев (например, для проводов резиновых) перед заливкой вывода компаундом его основание вулканизируют специальной резиной, имеющей такую адгезию.

Для катушек с литой изоляцией применяют также и металлические выводы (штыри), оформляемые при заливке в виде изоляторов из того же компаунда (см. рис. 14, 16). Подобные изоляторы можно изготовлять и отдельно с последующим сочленением с катушкой в процессе заливки. При сравнительно невысоких напряжениях можно сблизить выводы, разделив их барьерами, отливаемыми из компаунда в процессе заливки или

приклеиваемыми после предварительного изготовления (см. рис. 15). При весьма высоких напряжениях во избежание пробоя и коронирования выводы приходится выполнять достаточно протяженными (рис. 21).

Выводы гибкими проводами требуют меньших расстояний и позволяют уменьшить габариты трансформаторов, однако их широкому применению мешает недостаточно высокое качество таких проводов. Перспективны разработанные в последнее время специальные экранированные изоляторы из эпоксидных компаундов.

§ 4. ТРАНСФОРМАТОР В СБОРЕ

Наиболее прост в конструктивном отношении низковольтный тороидальный трансформатор на замкнутом сердечнике. После наложения на сердечник катушек трансформатор крепится к шасси прибора путем пропускания болта в центральное отверстие,

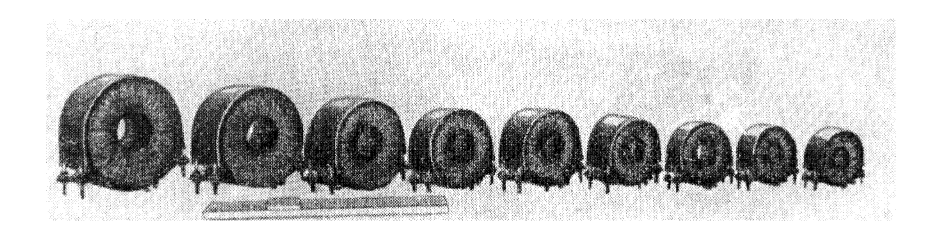


Рис. 22. Ряд тороидальных трансформаторов.

остающееся после намотки катушек, либо с помощью наружной охватывающей гибкой ленты. На рис. 22 показана серия тороидальных трансформаторов с подобным креплением. Первые работы по широкому применению в отечественной технике силовых тороидальных трансформаторов были проведены под руководством В. Л. Бреймана.

Рассмотрение остальных типов т. м. м. целесообразно дифференцировать по ряду признаков. При этом необходимо иметь в виду, что в каждом случае возможно одно из трех исполнений трансформатора: открытое, когда не предпринимается никаких мер для защиты катушек и сердечника (рис. 23, 28), защищенное, когда катушки частично закрыты специальными элементами конструкции (рис. 24), закрытое, когда весь трансформатор помещен в закрытый кожух (рис. 25). Все эти исполнения могут предусматривать меры по влагозащите. Закрытое исполнение может быть герметичным.

Трансформаторы на штампованных наборных сердечниках. Броневые и стержневые т. м. м. собираются путем шихтовки пластин магнитопровода в предварительно изготовленные катушки. Крепление трансформатора к шасси прибора осуществляется с помощью обжимной скобы с лапками (см. рис. 23) либо с помощью спе-

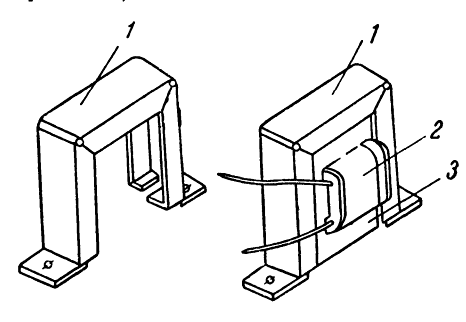


Рис. 23. Т. м. м. открытого исполнения с обжимной скобой.

1 — скоба; 2 — катушка; 3 — сердечник

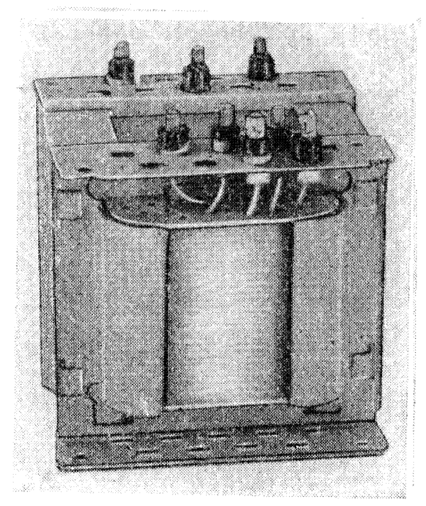
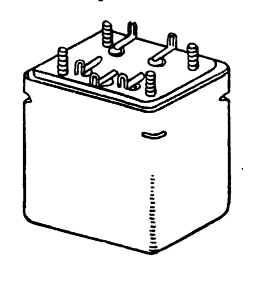


Рис. 24. Т. м. м. защищенного исполнения со специальными щеками для крепления.

циальных щек с полками для крепления (см. рис. 24), либо с помощью конструктивных уголков или защитного кожуха (см.



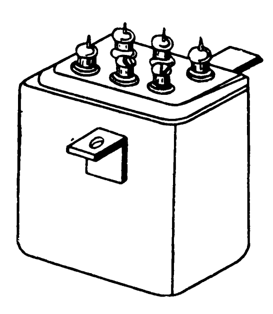


Рис. 25. Т. м. м. в закрытом исполнении.

рис. 25). В первых двух случаях скоба и щеки одновременно спрессовывают сердечник, в последнем — сердечник стягивается шпильками.

Очень малые, так называемые миниатюрные трансформаторы, размеры которых не превосходят 1—3 *см*, могут крепиться

за щеки прессованных или литых каркасов, сердечник же скрепляется при помощи склейки пластин лаком (рис. 26).

Такое крепление при помощи клея БФ-2 может применяться при тонких пластинах и для обычных сердечников.

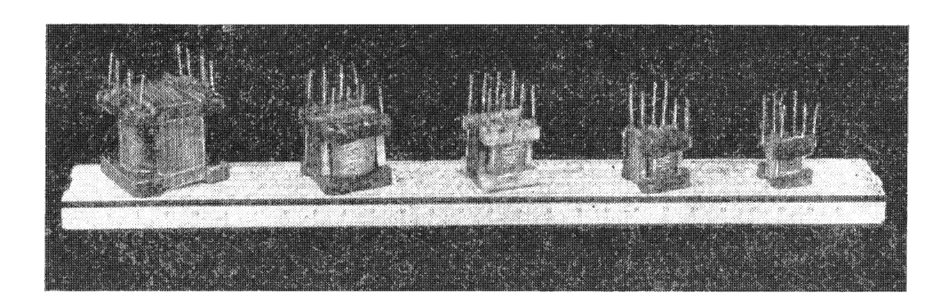


Рис. 26. Ряд миниатюрных трансформаторов.

Трансформаторы на ленточных сердечниках. Рассмотрим конструктивные особенности этих трансформаторов.

Способы сочленения магнитопровода и катушек. Наиболее просто осуществляется сочленение магнито-

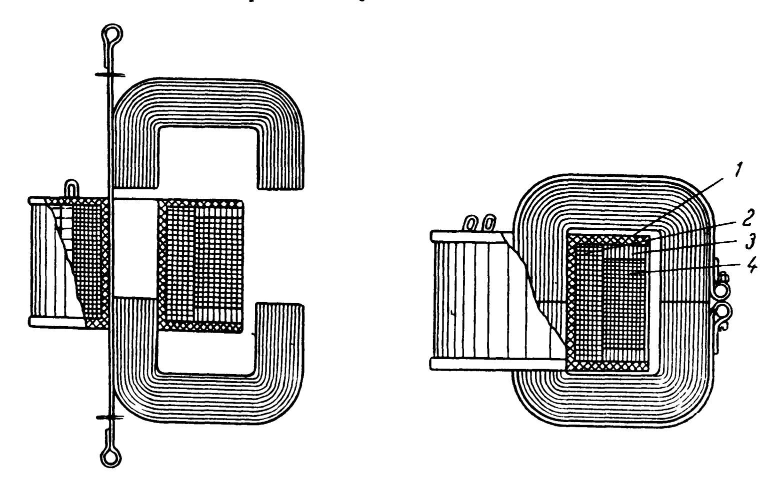


Рис. 27. Вставка разъемного ленточного сердечника в катушку.
1 — каркас катушки; *2* — первичная обмотка; *3*—изоляционный буртик; *4*—вторичная обмотка.

провода и катушек в случае применения разъемных сердечников. Когда разъем имеет каждый стержень магнитопровода, сборка трансформатора осуществляется простой вставкой половинок сердечника в заранее подготовленные катушки (рис. 27). В случае галетных катушек отдельные галеты поочередно нани-

зываются на сердечник. На рис. 28 изображен в сборе галетный стержневой, а на рис. 29 — галетный тороидальный трансформатор. В первом случае на галеты разбита только вторичная обмотка, первичная же обмотка является цельной, во втором случае на галеты разбиты обе обмотки.

Конструкция с разъемными сердечниками нашла наиболее широкое применение для броневых, стержневых и трехфазных трансформаторов. Для тороидальных трансформаторов, как правило, применяются замкнутые сердечники. Некоторое распространение получила для броневых трансформаторов конструкция сердечников с одним разъемом (с одним резом), разработанная под руководством Л. Н. Габай и Н. И. Змиевского. Такой сердечник получается путем резки верхнего ярма в месте его сопряжения со средним стержнем магнитопровода (рис. 30). Для сборки трансформатора необходимо с некоторым усилием отвести боковые стержни в стороны от среднего и на средний стержень надеть катушку, после чего боковые стержни возвращаются в исходное положение. Достоинством такого способа сборки является легкость обеспечения монолитности всей конструкции, существенными недостатками — затрудненность сборки, невозможность выполнения стержневых и трехфазных

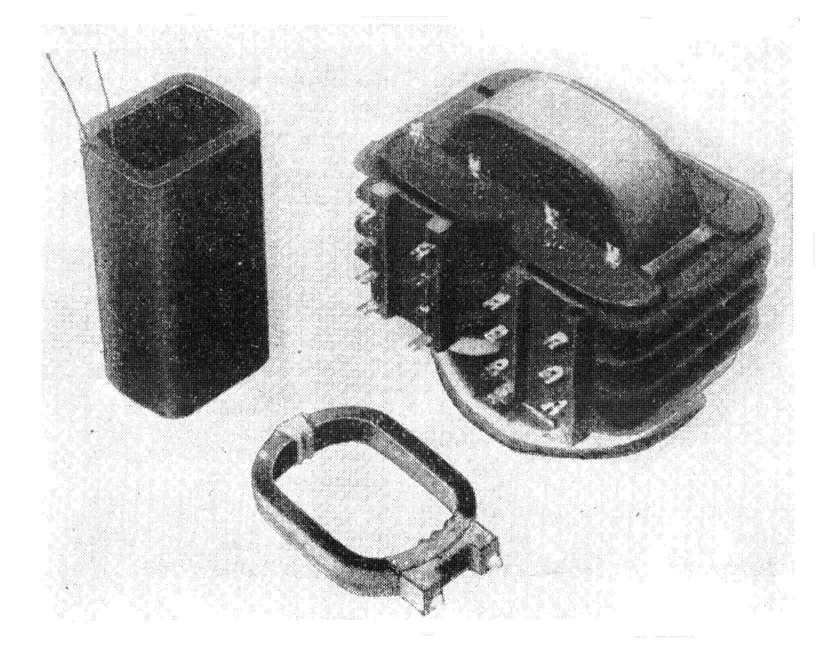


Рис. 28. Галетный стержневой трансформатор, его первичная обмотка и галета вторичной обмотки.

трансформаторов и ограниченность технологических приемов изготовления сердечника (см. гл. IV). Кроме того, расположение зазора (стыка) вне катушки увеличивает внешнее магнитное рассеяние.

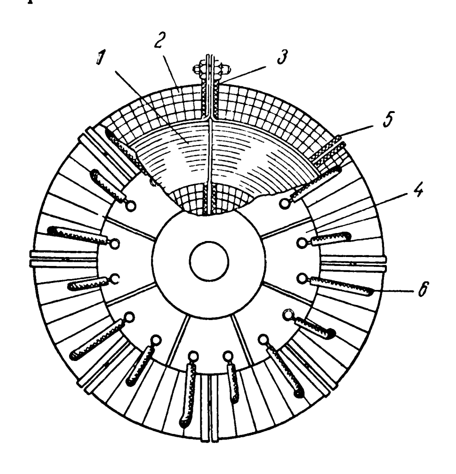


Рис. 29. Галетный тороидальный трансформатор.

1 — сердечник; *2* — галета катушки; *3* — стяжной бандаж; *4* — клеммная плата; *5* — изоляционная щека галеты; *6* — выводной конец.

При использовании замкнутых сердечников катушки наматывают на них либо вручную, либо путем использования принципа вращающейся катушки. Суть его состоит в следующем. Стержень трансформатора (квадратного сечения) охватывается с разных сторон двумя половинами каркаса (рис. 31). Половинки соединяют в замок, склеивают или, в случае использования капроновых каркасов, сваривают путем прогрева места стыка половинок. Используя фрикционное зацепление приводного валика намоточного устройства и щеки каркаса, последний можно привести во вращение вокруг стержня. Для улучшения сцепления щеки могут иметь зубчики. При вращении каркас сматывает на себя с бобины обмоточный провод. Намотка производится весьма производительно (до 5000 об/мин). Описанная конструкция примени-

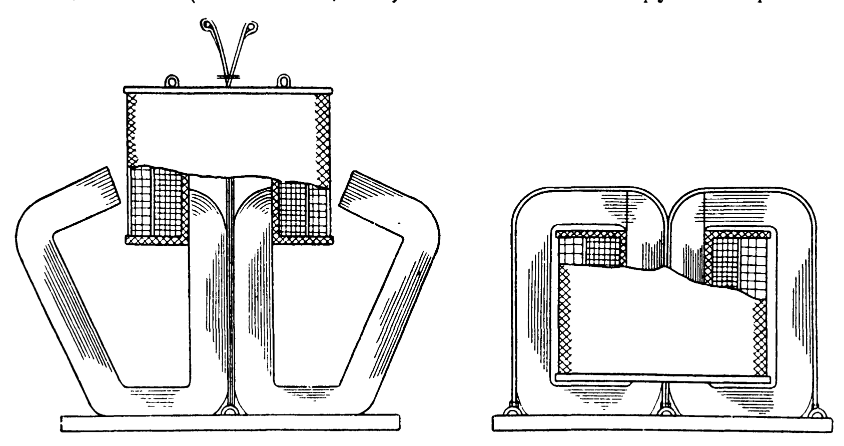


Рис. 30. Броневой трансформатор на ленточном сердечнике с одним резом и его сборка.

тельно к силовым т. м. м. на ленточных сердечниках практически разработана под руководством канд. техн. наук Е. И. Кисселя.

Трансформатор с вращающейся катушкой (т. в. к.) в различных стадиях изготовления изображен на рис. 31. Этот способ пригоден для изготовления трансформаторов всех типов, кроме тороидальных. Преимуществом такой конструкции является простота изготовления магнитопровода и его высокое качество. Серьезные недостатки — усложнение моточных работ, трудность выполнения выводов, необходимость применения сердечников только квадратного сечения. Имеет место также увеличение средней длины витка катушки из-за несоответствия форм сече-

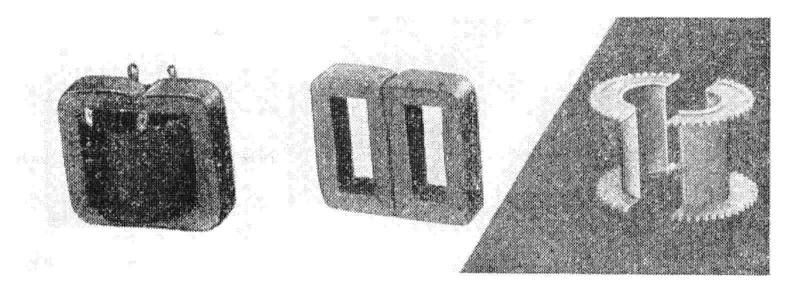


Рис. 31. Броневой трансформатор с вращающейся катушкой (т. в. к.).

ния сердечника и каркаса. Вследствие этих недостатков т. в. к. не получили широкого распространения.

Кроме перечисленных возможны также способ непрерывного вматывания ленточного сердечника в готовые катушки (так называемый спиракор) и сборка сердечника в катушках последовательно вставляемыми отдельными лентами. Основным недостатком первого способа является его сложность и невозможность отжечь сердечник после вматывания. Второй способ сборки примыкает к способу шихтовки пластинчатых сердечников (см. гл. IV). Оба эти способа следует считать устаревшими.

Способы стяжки сердечника. Проблема стяжки возникает только для разъемных сердечников. Стяжка половинок сердечника должна обеспечить конструктивную цельность магнитопровода, его механическую прочность. Необходимо также свести к минимуму воздушный зазор, неизбежно появляющийся в месте стыка половинок, с целью снижения шума трансформатора и уменьшения магнитного сопротивления сердечника. Последнее необходимо для обеспечения приемлемых величин намагничивающего тока. Как показывают расчеты и опыт, для малых силовых трансформаторов можно считать приемлемым зазор на

каждый стержень до 10—15 *мк*, для больших — до 30—50 *мк*.

Для трансформаторов, к которым предъявляется требование большой индуктивности обмоток, этот зазор не должен пре-

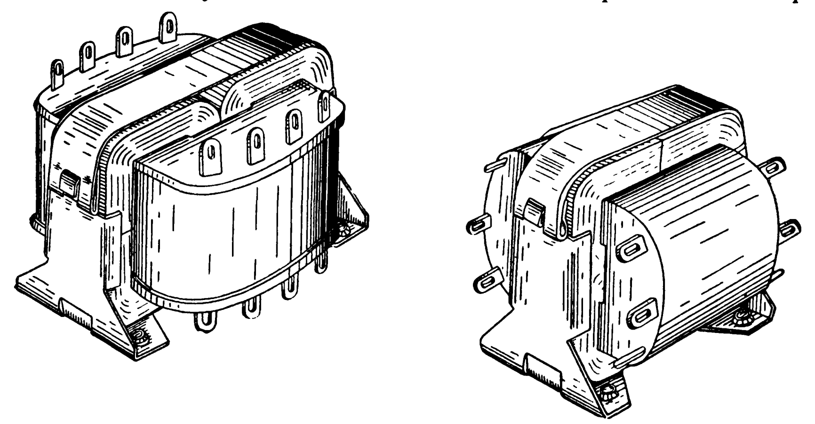


Рис. 32. Стяжка разъемного броневого сердечника лентой по наружному обводу (для двух разных положений трансформатора).

вышать нескольких микронов, особенно при использовании для сердечника материалов с высокой магнитной проницаемостью (типа пермаллоя). Для мощных импульсных трансформаторов желательно соблюдение оптимального зазора. Его величина за-

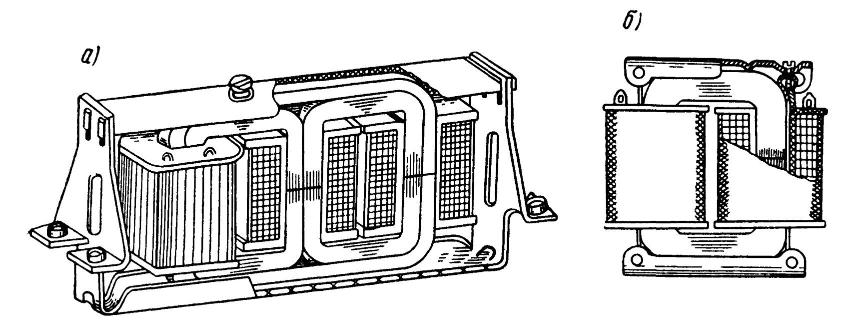


Рис. 33. Стяжка разъемного сердечника прижимными планками: *а* — со стяжными планками (трехфазный трансформатор); *б* — со стяжными лентами.

висит от ряда факторов. Для микросекундных импульсов при реализации значительных приращений индукции эта величина составляет ориентировочно (2—6) $\times$ 10^{-4} от длины средней линии магнитной индукции.

Применяют два основных способа стяжки: металлическим бандажом (лентой), охватывающим с определенным натягом обе половинки сердечника, и прижимными планками со стяж-

ными винтами или стяжными лентами. Очень часто стяжные элементы используют одновременно для закрепления трансформатора на плате, тогда они воспринимают все усилия, которые воздействуют на трансформатор в процессе его эксплуатации. Это является нежелательным, поскольку может привести к некоторой нестабильности зазора. Целесообразнее поэтому, особенно при тяжелых условиях эксплуатации, разделить между элементами конструкции функции стяжки сердечника и крепления трансформатора.

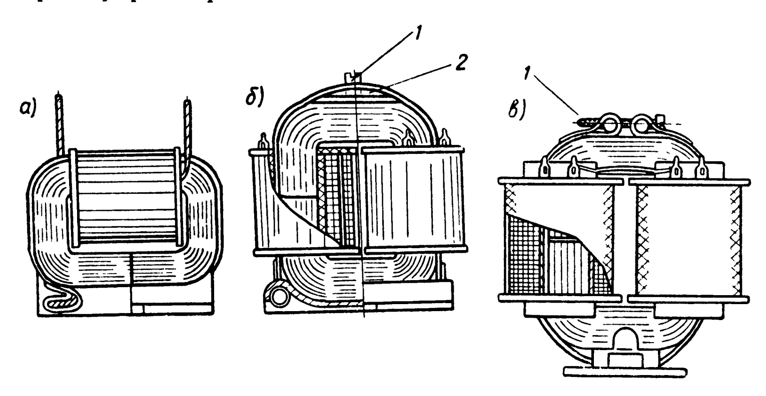


Рис. 34. Способы стяжки разъемного сердечника лентой: *а, б, в* — для малых т. м. м.; *в* — для средних т. м. м.
1 — винт натяга; *2* — опорная колодочка.

Способы стяжки лентой показаны на рис. 27, 32, 34, 35, планками — на рис. 33. Стяжка планками и стяжка лентой броневого сердечника по наружному обводу позволяют избежать введения конструктивных элементов внутрь катушки. Это несколько уменьшает среднюю длину витка катушки и позволяет избежать добавочных потерь на вихревые токи и гистерезис в этих элементах. Последнее особенно важно для трансформаторов ультразвуковых и высоких частот. Если в этих случаях используется лента, пропускаемая внутрь катушки, желательно, чтобы она была из немагнитного материала. В остальных случаях материалом ленты может служить обычная сталь Ст. 10. Толщина ленты 0,2—0,6 *мм*, в зависимости от веса сердечников.

Стяжка лентой по сравнению со стяжкой планками при прочих равных условиях обеспечивает лучшие результаты, особенно когда лента охватывает контур сердечника по всему обводу. В частности, при стяжке планками возможно некоторое смещение половинок сердечника в перпендикулярном к оси стержня направлении, что приводит к повышенному шуму при работе трансформатора.

С целью уменьшения эффективного зазора между половинками и повышения прочности сочленения торцы сопрягаемых

половинок сердечника при сборке можно склеивать специальной пастой, например смесью эпоксидной смолы с карбонильным железом. Для малых сердечников склейка может полностью исключить необходимость механической стяжки половинок.

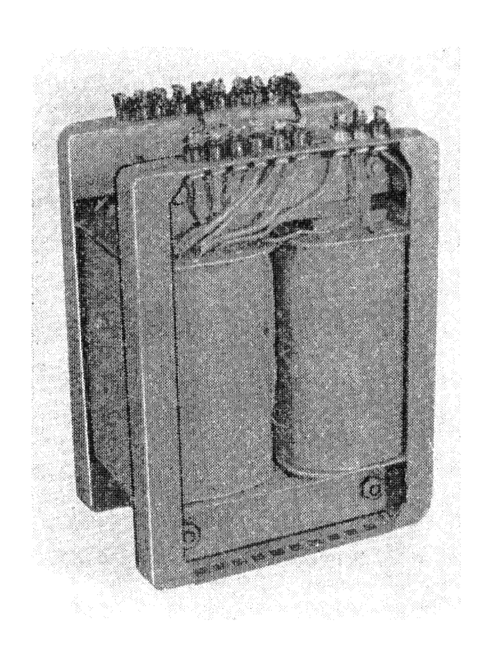


Рис. 35. Стержневой трансформатор на разъемном ленточном сердечнике с разделением функций стяжки сердечника и крепления трансформатора между различными элементами конструкции.

Крепление трансформатора. Опорой сердечника, несущего на себе катушки, является, как правило, литая, штампованная или иным образом изготовленная металлическая плата или рамка, при помощи которой весь трансформатор крепится к шасси прибора. При использовании элементов стяжки одновременно для закрепления трансформатора на плате возможны конструкции, представленные на рис. 32—34 и 17—18. Стяжка половинок производится при окончательной сборке трансформатора путем натяга ленты, закрепляемой на плате. В случае разделения функций стяжки и крепления для маленьких трансформаторов возможно применение такой же обжимной скобы, как было показано на рис. 23, или крепление за каркас, как на рис. 26. Более универсальный вариант показан на рис. 35.

Совершенно новые возможности крепления высоковольтных трансформаторов открылись с применением для их изоляции эпоксидных компаундов. Такие трансформаторы можно крепить не за сердечник, а за катушку. С этой целью в форме при заливке катушки компаундом армируют металлические буксы с резьбой. С помощью винтов, ввинчиваемых в эти буксы, и осуществляется крепление трансформатора. Как показали испытания, этот способ обеспечивает исключительную стойкость к тяжелым механическим воздействиям — ударам, вибрации и т. д. Тороидальный трансформатор такой конструкции показан на рис. 15, 16.

Серии стержневых и броневых трансформаторов на разъемных ленточных сердечниках показаны на рис. 36 и 37.

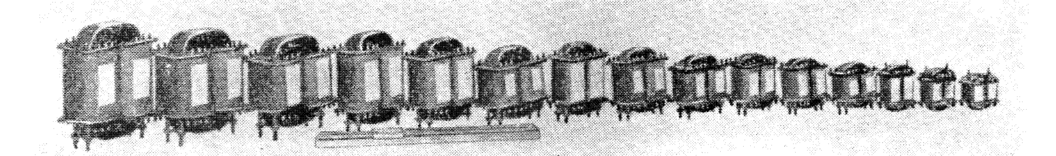


Рис. 36. Серия стержневых трансформаторов на разъемных ленточных сердечниках.

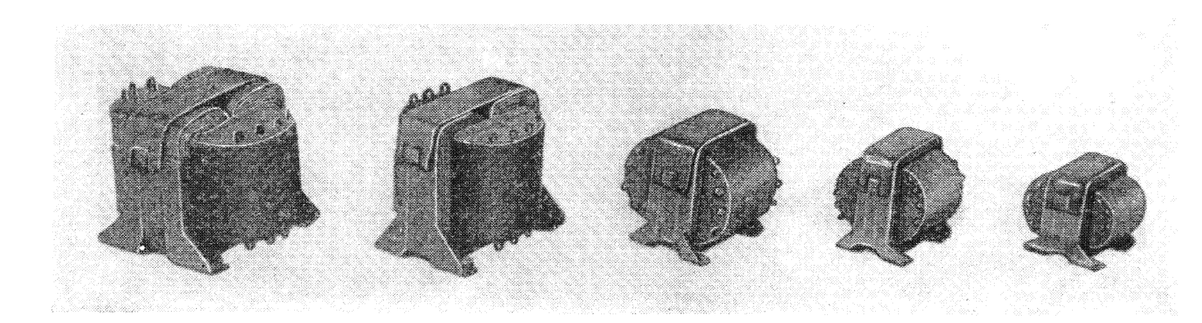


Рис 37 Серия броневых трансформаторов на разъемных ленточных сердечниках

Специальные конструкции трансформаторов. Помимо рассмотренных вариантов основных конструкций БТ и ЗТ, базирующихся на сердечниках, конфигурация которых показана на рис. 4, возможны специальные конструкции, обладающие рядом новых качеств.

Броневой трансформатор. К. Г. Бираговым и А. Я. Финкельштейном предложена конструкция с кольцевой цилиндрической катушкой и радиально расположенными по ее периметру П-образными разъемными ленточными сердечниками (рис. 38). Достоинством такого трансформатора является сильно развитая поверхность охлаждения сердечника, что позволяет интенсивно использовать его магнитный материал на повышенных и ультразвуковых частотах. Этим целиком окупается некоторая потеря окна катушки, т. е. снижение коэффициента заполнения $к_с$. При больших мощностях габариты и вес такого трансформатора меньше, чем при обычном исполнении. Конструкция отличается также компактностью. Особые преимущества она приобретает при применении ее для высоковольтных сухих трансформаторов.

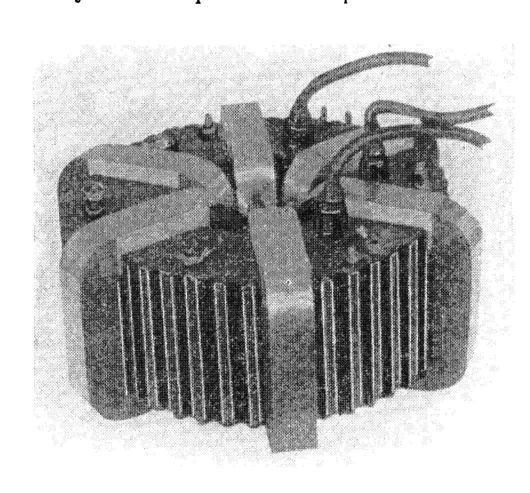


Рис. 38. Броневой трансформатор с радиально расположенными ленточными сердечниками.

Трехфазные трансформаторы можно выполнять на трех стержневых ленточных сердечниках, сечения которых располагаются по вершинам равностороннего треугольника. Соседние стержни вставляют в каркас, которому придается соответствующая форма (рис. 39). Для такого трансформатора проще изготовить сердечник, при этом обеспечивается компактность конструкции, полная симметрия трех фаз и некоторая экономия стали, однако изготовление каркасов несколько усложняется, увеличивается средняя длина витка катушек и при отсутствии продува ухудшается охлаждение внутренних частей катушек.

Компактная конструкция группового трехфазного трансформатора, состоящего из трех однофазных броневых трансформаторов на фигурных разъемных ленточных сердечниках, разработана А. К. Цыпкиным (рис. 40). Треугольные сердечники расположены по кругу вплотную друг к другу. Разъем делается по краям наружного ярма. Три катушки, имеющие в попереч-

нике форму окна сердечника, надеваются каждая на свой стержень, после чего каждый однофазный сердечник или наружный периметр всего трансформатора охватывается стягивающими лентами. В ряде случаев благодаря своей компактности и полной симметрии трех фаз такой трансформатор при нормальной частоте может оказаться наиболее приемлемым.

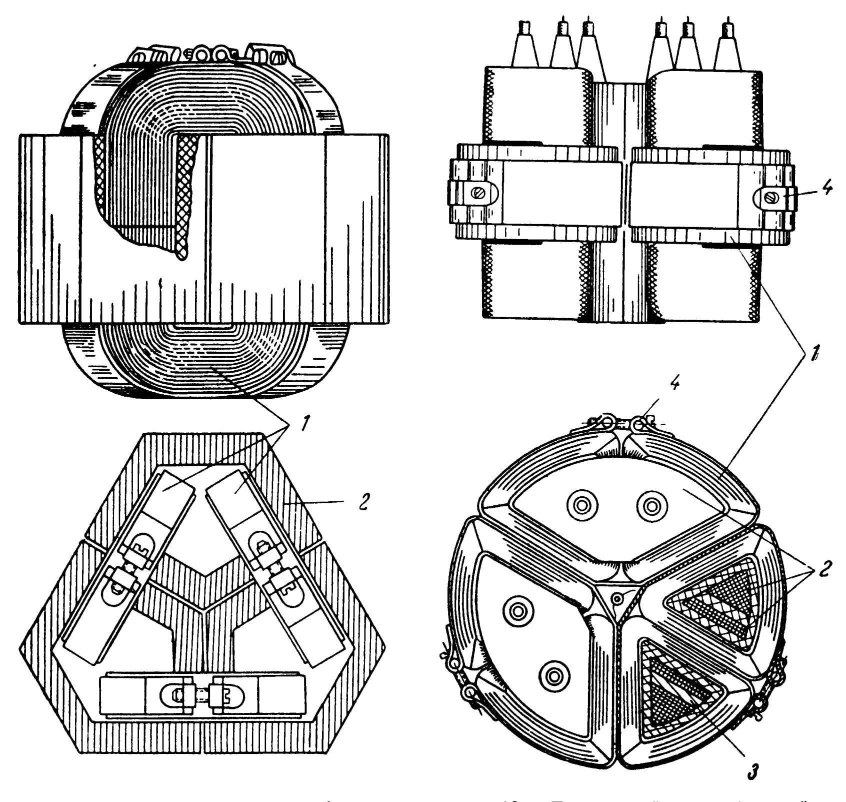


Рис. 39. Симметричный трехфазный трансформатор на трех разъемных ленточных сердечниках.

1 — сердечник; *2* — катушки.

Рис. 40. Групповой трехфазный трансформатор на фигурных разъемных ленточных сердечниках.

1 — сердечник; *2* — обмотки; *3* — межобмоточная изоляция; *4* — лента с сухариками и винтом для стяжки сердечника.

Заключительные замечания. Рассмотренные выше принципы выполнения конструкций применимы, за некоторыми оговоренными исключениями, ко всем типам трансформаторов. Отдельные из них имеют, однако, те или иные особенности, которые следует дополнительно рассмотреть.

Для двухкатушечного стержневого трансформатора важно обратить внимание на порядок расположения обмоток по

стержням. Чтобы избежать недопустимо большого расстояния между обмотками, первичную обмотку всегда нужно разбивать на две равные части, располагаемые на двух стержнях и соеди-

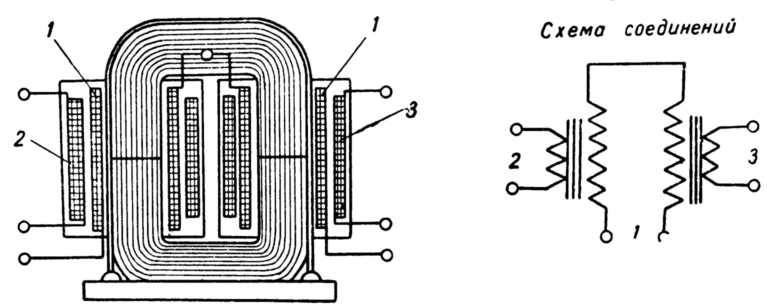


Рис. 41. Стержневой трансформатор с двумя накальными обмотками.
1 — первичная обмотка; 2, 3 — накальные обмотки.

няемые последовательно или параллельно (см. также ниже, § 17). То же в общем случае справедливо и для каждой вторичной обмотки. Однако если этих обмоток две и более, можно каждую обмотку располагать целиком на одном стержне, так

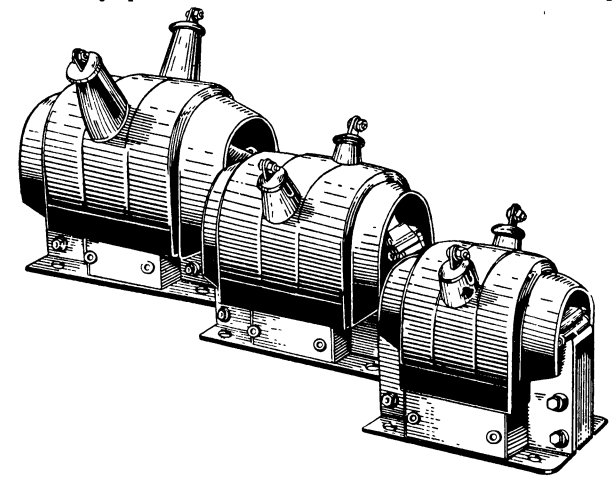


Рис. 42. Однокатушечные стержневые высоковольтные трансформаторы с изоляцией термореактивным компаундом.

группируя их, чтобы суммарные мощности вторичных обмоток на каждом стержне были приблизительно одинаковы. Это упрощает конструкцию трансформатора. Стержневой трансформатор с двумя одинаковыми накальными обмотками показан на рис. 41. Это положение используется, в частности, в галетных трансформаторах. Заметим, что хотя принципиально галетные трансфор-

маторы можно изготовлять и в броневом исполнении, практически такие трансформаторы изготовляют обычно как стержневые, так как желательно разместить как можно большее число галет.

Если сравнить в конструктивном отношении разные типы однофазных трансформаторов, то можно сказать, что простейшим из них является однокатушечный стержневой трансформатор, особенно при использовании ленточных сердечников. Поэтому его применение рационально в ряде случаев для высоковольтных трансформаторов, где вопросы простоты конструкции выступают на первый план. Высоковольтные однокатушечные стержневые трансформаторы показаны на рис. 42. Из броневых и двухкатушечных стержневых т. м. м. при штампованных наборных сердечниках предпочтения заслуживают первые; при ленточных сердечниках вопрос усложняется: БТ проще вследствие использования одной катушки, вместо двух у СТ, но требуют двух сердечников (см. рис. 3, 4) с соответствующим усложнением конструкции. Тороидальный трансформатор достаточно прост с точки зрения крепления, но здесь затруднено выполнение надежной слоевой и межобмоточной изоляции. Подробное сравнение различных типов т. м. м. по ряду признаков проведено ниже, в § 22.

Для применения в качестве высоковольтных и высокопотенциальных каждый из этих типов трансформаторов может оказаться лучшим в зависимости от конкретных условий. В частности, в высокопотенциальном ТТ из-за отсутствия открытого корпуса облегчено выполнение корпусной изоляции. Так, без принятия специальных мер удается выполнять некоронирующие сухие залитые ТТ с потенциалом до 25 *кв*.

В заключение отметим, что конструкции современных т. м. м., предназначенных для использования в специальной аппаратуре, рассчитаны на высокие требования в части механических и климатических воздействий (удары, тряска, вибрации, влажность, мороз, высотность и т. д.).

ГЛАВА III

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

§ 5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитный материал сердечника имеет две основные характеристики: химический состав, определяемый маркой материала, и толщину листа или ленты. Выбор того и другого зависит от предъявляемых к трансформатору требований — габаритных показателей, экономичности, стоимости. Так, для снижения потерь

в сердечнике на вихревые токи выбирают материал меньших толщин. В настоящее время находят применение материалы очень широкого диапазона значений толщины — от 0,5 *мм* до 0,02 *мм*. Снижение потерь в сердечнике может быть достигнуто и применением соответствующих марок материала.

От выбранной марки зависит также величина необходимой намагничивающей силы (н. с.), т. е., в конечном итоге, тока холостого хода. Применение качественных материалов позволяет выполнить при заданной мощности трансформатор меньших габаритов и веса или с большим к. п. д. (в ряде случаев это приводит к увеличению стоимости трансформатора).

Длительное время для изготовления сердечников силовых т. м. м. использовали исключительно трансформаторные стали горячей прокатки с различным содержанием кремния. Подобные стали широко применяют и сейчас. Это стали марок Э41, Э42, Э43, Э44 (по ГОСТ 802—58). Из них первые три предназначены преимущественно для частоты 50 *гц*, а сталь Э44 — для частот 400 *гц* и выше. Они выпускаются в листах с размерами сторон от 600 × 1500 *мм* до 1000 × 2000 *мм*.

В последние годы отечественная промышленность освоила выпуск холоднокатаных трансформаторных сталей марок «Э» (распространенное название ХВП). Эти стали обладают пониженными удельными потерями, высокой индукцией насыщения и относительно высокой магнитной проницаемостью в средних и сильных полях, т. е. при больших индукциях. Это особенно ценно для силовых трансформаторов. Получены холоднокатаные стали и с повышенной магнитной проницаемостью в слабых полях (для входных трансформаторов и ряда других случаев). Особенностью холоднокатаных сталей является наличие магнитной текстуры, т. е. преимущественность магнитных свойств в определенном направлении, именно вдоль направления проката. Поэтому их применение полностью оправдывает себя лишь в тех случаях, когда конструкция сердечника обеспечивает совпадение направлений магнитного потока и магнитной текстуры вдоль всей длины магнитной линии. Это обстоятельство и вызвало, в частности, к жизни конструкции ленточных сердечников.

Холоднокатаные стали выпускают как в листах, так и в виде длинных рулонов или лент. Отечественные стали холодной прокатки получили по ГОСТ 802—58 наименования Э310, Э320, Э330 в толщинах 0,35—0,5 *мм*, Э340 — в толщине 0,2 *мм*. По проекту ГОСТ на ленточную холоднокатаную сталь последняя именуется как Э31, Э32, Э33 в толщинах 0,35—0,5 *мм*; Э31 — Э34 — в толщине 0,2 *мм*; Э34, Э35, Э36 — в толщинах 0,05—0,15 *мм*. Лента выпускается в стандартных ширинах: 5; 5,6; 6,3; 6,5; 7,1; 8; 9; 10; 11,2; 12; 12,5; 14; 15; 16; 18; 20; 22,4; 25; 28; 32; 35,5; 40; 45; 50; 56; 64; 71; 80; 90; 100 *мм*.

Разработана прецизионная холоднокатаная сталь 3СТА, требующая усложненной технологии, но обладающая улучшенными свойствами. В зарубежной литературе холоднокатаную сталь часто называют гайперсил.

Внедрение холоднокатаной стали в области т. м. м. идет быстрыми темпами. Поскольку стоимость холоднокатаной стали лишь немного превосходит стоимость горячекатаной, а при больших масштабах производства может стать даже ниже, условия для ее распространения весьма благоприятны.

Для трансформаторов повышенных частот, а также различных входных, выходных, импульсных находят применение в виде листов и лент специальные сплавы железа и никеля с различными присадками марок 50Н, 80НХС, 79НМ и др. Первый из них имеет наивысшую индукцию насыщения, второй и третий — минимальные удельные потери. Новый сплав 33НКМС хорошо сочетает оба эти качества. Перспективен благодаря своей дешевизне и достаточно высоким магнитным свойствам на повышенных и ультразвуковых частотах, особенно в части магнитной проницаемости, сплав железа с алюминием — алфенол. Сочетанием высокой начальной и максимальной магнитных проницаемостей отличаются сплавы 74НМД ($50\times10^3/150\times10^3$) и супермаллой ($10^5/10^6$).

Для импульсных трансформаторов могут использоваться также железоникелевые сплавы с высоким электросопротивлением 38НС, 42НС, 50НХС. Все перечисленные здесь и выше сплавы являются материалами нетекстурованными.

На высоких частотах используют магнитодиэлектрики и оксидные ферромагнетики, называемые обычно оксиферами или ферритами. Последние начинают применять также для импульсных трансформаторов.

Основные свойства отожженных магнитных материалов на переменном токе, необходимые при расчете различных т. м. м., приведены в табл. 2—5. Для полноты в таблицах указаны и отдельные характеристики на постоянном токе. Для выражения приведенных в таблице величин удельных н. с. $H_{\sim}$ через намагничивающую мощность Q (*ва/кг*) и наоборот можно пользоваться зависимостью

$$Q=4{,}44 f 10^{-5} H_{\sim} B \frac{1}{\gamma_c}, \qquad (1)$$

где γ_c — удельный вес материала, *г/см*^{3}.

Табл. 2—5 составлены по материалам: ГОСТ 802—58, проекту ГОСТ на ленточную сталь, техническим условиям на ленточную сталь, на железоникелевые сплавы, а также по результатам проведенных исследовательских работ и литературным данным.

Свойства трансформаторных сталей на частоте 50 *гц*

Таблица 2

Сталь			Свойства на постоянном токе		Свойства на переменном токе при 50 *гц*						
Вид	Марка	Толщина, *мм*	Индукция *B*, *гс*		Начальная магнитная проницаемость μ_0, *гс/э*	Напряженность в действующих значениях $H_{\sim}$, *а/см*			Удельные потери p'_t, *вт/кг*		
			Напряженность $H_{=}$, *а/см*			*B*, *гс*			*B*, *гс*		
			10	25		10 000	15 000	17 000	10 000	15 000	17 000
Горячекатаные (уд. вес $\gamma_c = 7,55$)	Э41	0,5 0,35	13 000	14 600	350—400	1,7	11	—	1,55 1,35	3,5 3,0	—
	Э42	0,5 0,35	12 900	14 500	350—400	1,7	11	—	1,4 1,2	3,1 2,8	—
	Э43	0,5 0,35	12 900	14 400	350—400	1,7	11	—	1,25 1,05	2,9 2,5	—
	Э43а	0,5 0,35	12 900	14 400	350—400	1,7	11		1,15 0,9	2,7 2,2	—
Холоднокатаные (уд. вес $\gamma_c = 7,65$)	Э310, Э31	0,5 0,35 0,2	16 000 16 000 14 500	17 500 17 500 17 000	500	0,7	2,5	6	1,1 0,8 —	2,45 1,75 1,5	3,2 2,5 2,2
	Э330, Э33	0,5 0,35 0,2	17 000 17 000 16 500	18 500 18 500 18 200	600—700	0,5	1,8	4	0,8 0,6 —	1,75 1,3 1,2	2,5 1,9 1,8
Лучшие партии горячекатаной стали	—	0,35	—	—	—	1	7	—	0,95	2,2	—
Лучшие партии холоднокатаной стали	—	0,35	—	—	1500	0,3	0,6	2,5	0,45	1,0	—

Таблица 3

Свойства трансформаторных сталей на частоте 400 *гц*

Сталь			Свойства на постоянном токе		Свойства на переменном токе при 400 *гц*						
Вид	Марка	Толщина, *мм*	Индукция *B*, *гс*		Напряженность в действующих значениях $H_{\sim}$, *а/см*				Удельные потери p_i', *вт/кг*		
			Напряженность $H_{=}$, *а/см*		*B*, *гс*				*B*, *гс*		
			10	25	7 500	10 000	15 000	17 000	7 500	10 000	15 000
Горячекатаная	Э44	0,35 0,2 0,1	13 000 12 900 12 800	14 000 14 200 14 000	2,8	5	18	—	10,7 7,2 6	19 12,5 10,5	— 30 —
Холоднокатаные рулонные	Э34	0,2 0,15 0,1 0,08 0,05	16 000 14 500 14 500 14 500 14 500	17 000 17 000 17 000 17 000 17 000	—	0,7	2,8	6,5	—	11 10 10 10 10	23 23 22 22 21
	Э35	0,15 0,1 0,08 0,05	15 500	17 500	—	0,6	2,6	6	—	9 8,5 8,5 8,5	20 19 19 19
	Э36	0,15 0,1 0,08 0,05	16 500	18 200	—	0,5	2,5	5	—	8 7,5 7,5 7,5	19 17 17 16
Лучшие партии холоднокатаной стали	—	0,1	—	—	—	0,35	0,7	2,8	—	6	14

Примечание. Сталь 3СТА имеет потери на 15–20% меньшие, чем сталь Э36.

Свойства различных магнитных материалов на

Материал				Общие свойства		Свойства на переменном				
						400				
								Удельные потери, *вт/кг*		
								B, *гс*		
Вид	Удельный вес, *г/см*³	Марка	Толщина, *мм*	Индукция насыщения B_s, *гс*	Коэрцитивная сила H_c, *э*	μ_0, *гс/э*	μ_{max}, *гс/э*	3000	5000	10 000
Сталь горячекатаная	7,55	— Э44	0,05 0,1	~19 000	~1,2 ~1	300 350	— —	2,7 1,2	7 3	25 10,5
Сталь холоднокатаная	7,65	Э35	0,2 0,15 0,08 0,05 0,02	~21 000	0,25 0,33 0,35 0,40 0,5	900 800 600 500 450	7 000 6 800 6 500 6 200 5 100	1,0 0,9 0,8 0,8 1,2	2,4 2,3 2,1 2,1 2,6	9,5 9 8,5 8,5 10
Сплавы с никелем	8,2	50 Н	0,15 0,05	15 000	0,20 0,25	3 500 2 500	11 000 14 000	0,6 0,5	1,5 1,3	5,5 5
	8,5	80НХС, 79НМ	0,10 0,05 0,02	7000— —7500	0,04 0,05 0,06	20 000 20 000 12 500	60 000 52 000 43 000	0,2 0,15 0,2	0,5 0,45 0,55	— — —
Сплав алфенол	—	Ю-16	0,2	7000	0,05	3000	30 000	—	—	—
Оксидный ферромагнетик	4,6	Феррит-400	—	2300	0,8	—	—	—	—	—

Примечания. 1. Сталь ЗСТА имеет потери на 25—40% меньшие, чем сталь Э35.
2. Сплав 33НКМС при большой индукции насыщения имеет потери

Таблица 4

повышенных и ультразвуковых частотах

токе при частотах, *гц*

1000					2400				
μ_0, *гс/э*	μ_{max}, *гс/э*	Удельные потери, *вт/кг*; *B*, *гс* 3000	5000	10 000	μ_0, *гс/э*	μ_{max}, *гс/э*	Удельные потери, *вт/кг*; *B*, *гс* 3000	5000	10 000
300	—	9	26	102	300	—	22	65	250
350	—	4,3	11	38	350	—	17	41	145
700	5 000	4,5	11	43	—	—	20	50	200
600	4 800	3,8	9,5	38	—	—	15	37	150
500	4 600	3	7,5	30	450	3 200	12	30	120
450	5 200	2,6	6,5	26	420	4 500	10	24	95
400	5 000	3,5	8,0	31	380	4 600	11	25	96
3 100	6 000	2,1	5	20	2 500	3 500	8,5	20	81
2 400	12 000	1,6	4	14	2 300	7 000	4,7	11	45
15 000*	35 000	0,7	2	—	8 000	10 000	3,5	9,5	—
18 500	36 000	0,6	1,6	—	16 000	20 000	2	6	—
12 300	39 000	0,5	1,3	—	12 000	30 000	1,3	4	—
—	—	—	—	—	—	—		—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

лишь несколько большие, чем сплав 80НХС.

Материал				Общие свойства		Свойства на	
Вид	Удельный вес, *г/см*³	Марка	Толщина, *мм*	Индукция насыщения B_s, *гс*	Коэрцитивная сила H_c, *э*	μ_0, *гс/э*	μ_{max}, *гс/э*
Сталь горячекатаная	7,55	— Э44	0,05 0,1	~19 000	~1,2 ~1	300 350	— —
Сталь холоднокатаная	7,65	Э35	0,2 0,15 0,08 0,05 0,02	~21 000	0,25 0,33 0,35 0,40 0,5	— — 400 400 360	— — 1 200 2 500 2 900
Сплавы с никелем	8,2	50Н	0,15 0,05	15 000	0,20 0,25	1 000 2 000	1 100 4 000
	8,5	80НХС, 79НМ	0,10 0,05 0,02	7000 —7500	0,04 0,05 0,06	3 000 8 000 10 500	3 000 8 000 19 000
Сплав алфенол	—	Ю-16	0,2	7000	0,05	—	—
Оксидный ферромагнетик	4,6	Феррит-400	—	2300	0,8	—	—

переменном токе при частотах, *гц*							
10 000				50 000			
Удельные потери, *вт/кг*				μ_0, *гс/э*	Удельные потери, *вт/кг*		
B, *гс*					*B*, *гс*		
1000	3000	5000	10 000		1000	3000	5000
12	92	230	—	250	240	2200	—
16	126	300	1000	220	—	—	—
20	200	530	2100	—	-	—	—
16	160	370	1500	—	—	—	—
11	110	250	1000	—	—	—	—
8	75	190	750	—	90	1000	2400
7	70	170	700	—	60	650	1600
11	92	220	860	500	-	—	—
4	42	85	300	1200	55	350	750
3,3	22	100	—	1000	—	—	—
1,6	15	42	—	2500	16	160	600
1	9	30	—	7000	3,3	90	270
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	400	130	—	—

Таблица 5

Свойства магнитодиэлектриков и ферритов

Материал			Свойства						
Название		Марка	μ_0, *гс/э*	μ_{max}, *гс/э*	B_s, *гс*	B_r, *гс*	H_c, *э*	Максимальная рабочая температура, °C	Пограничная частота, *кгц*
Магнитодиэлектрики; удельный вес 4,5—5,5	Карбонильное железо		8	8	2000	—	—	—	10^3
	Алсиферы	ТЧ-60	60	60	2000	—	—	120	10
		ВЧ-30	30	30	2000	—	—	120	50
		ВЧ-15	15	15	2000	—	—	120	100
Ферриты (оксиферы); удельный вес 4,6—5,2	Никельцинковые	2000	1800—2400	6500	2500	1200	0,1	70	200
		1000	800—1200	3000	3200	1500	0,25	110	500
		600	500—800	1300	3100	1400	0,4	120	1×10^3
		500	400—600	1100	2800	1300	0,5	120	2×10^3
		400	350—500	800	2300	1200	0,8	120	5×10^3
		200	180—250	300	1800	1000	1,5	120	10×10^3
		И-4	150—200	800	4200	2000	0,8	250	1×10^3
		И-5	100—150	700	4800	2200	1,2	360	$>10\times10^3$
Ферриты (оксиферы); удельный вес 4,6—5,2	Марганеццинковые	М 6000	5000—7000	9000	4700	1200	0,1	120	100
		М 4000	3000—5000	7000	4500	1300	0,1	120	250
		М 3000	2500—3500	5500	3500	1500	0,15	120	400
		М 2000	1500—2500	3500	5000	1400	0,2	180	600
		М 1000	1000—1200	1700	3700	1100	0,35	180	1×10^3

Примечание. Пограничная частота — частота, выше которой начинается падение магнитной проницаемости. Ниже этой частоты μ_0 и μ_{max} практически постоянны.

Для наглядности кривые намагничивания различных материалов на переменном токе и кривые их удельных потерь при различных частотах приведены на рис. 43 и 44.

Свойства текстурованных материалов определены в направлении проката. На рис. 45 для сравнения даны значения $H_{\sim}$ в направлении, перпендикулярном к текстуре, для отечественной стали ХВП. Увеличение потерь составляет примерно 50%. По американским данным, рост $H_{\sim}$ в этом направлении больше в несколько раз, а рост потерь — в три раза. В последние годы создана новая прецизионная сталь кубической текстуры, у которой свойства вдоль и поперек отличаются весьма мало.

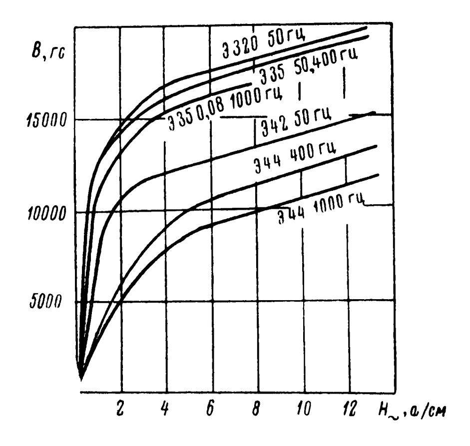


Рис. 43. Кривые намагничивания трансформаторных сталей на переменном токе при различных частотах.

Поскольку т. м. м. приходится выполнять в настоящее время на самые различные частоты, необходимо располагать характеристиками материалов в широком диапазоне частот. При этом основной интерес представляют удельные потери. Во многих случаях необходимо также знание начальной магнитной проницаемости. Зависимости этих величин от частоты в широком диапазоне ее изменений приведены для различных материалов на рис. 46 и 47. Кривые удельных потерь приведены при некоторых фиксированных индукциях B_n. При необходимости пересчета величины потерь на другие значения индукций B можно с достаточной для практики точностью для большинства материалов и частот пользоваться квадратичной зависимостью потерь от индукции

$$p_i' = p_n' \left(\frac{B}{B_n} \right)^2, \qquad (2)$$

где p_i' — искомые удельные потери при индукции B;

p_n' — удельные потери при индукции B_n.

Гораздо сложнее найти зависимость между удельными потерями и частотой. Поскольку с ростом частоты усиливается влияние вихревых токов, то чем толще материал и выше рассматриваемый диапазон частот, тем сильнее с ростом частоты растут потери в материале. Зависимости эти, кроме того, различны для различных материалов. Например, для стали ХВП удельный

вес потерь на вихревые токи значительно выше, чем для горячекатаных сталей,— 80% против 60% (при частоте 50 *гц* и толщине 0,35 *мм*).

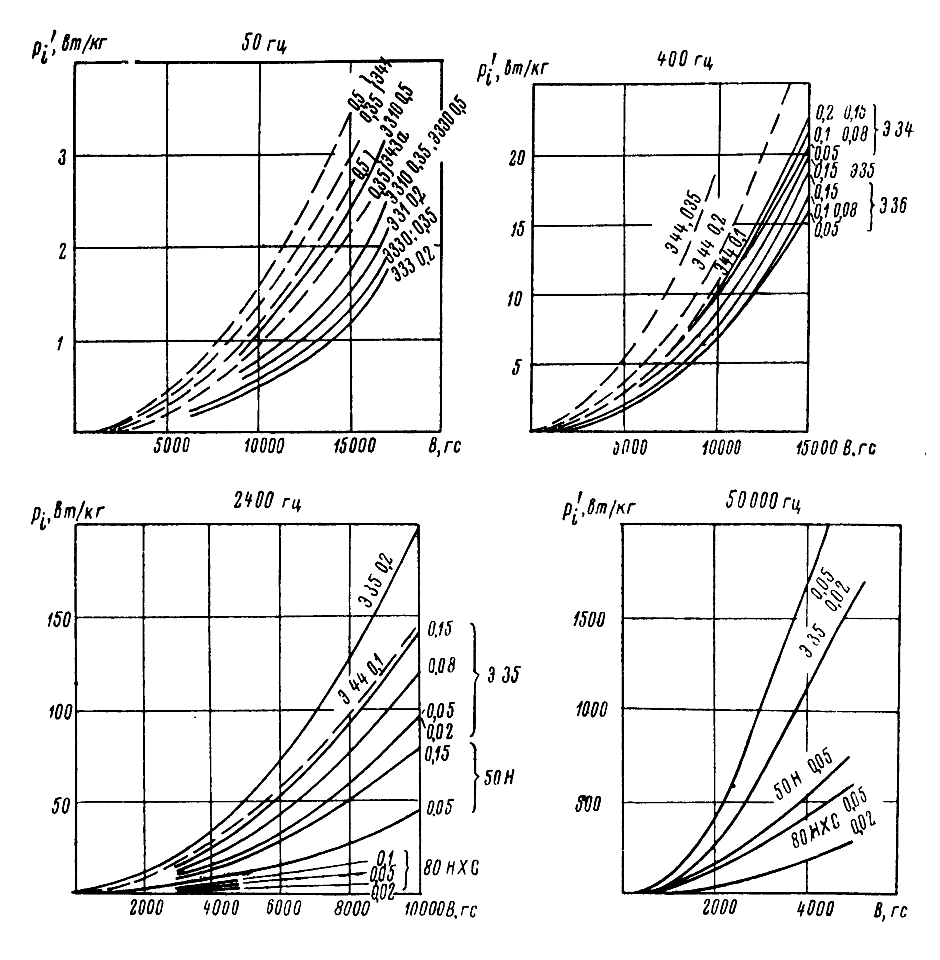


Рис. 44. Удельные потери различных магнитных материалов при различных частотах.

——— — холоднокатаные стали и сплавы;
- - - - — горячекатаные стали

В общем случае можно записать

$$p_i' \equiv f^{x}. \qquad (3)$$

Примерные значения частотного коэффициента потерь x даны в табл. 6.

Таблица 6

Ориентировочные значения частотного коэффициента потерь $\varkappa$

Диапазон частот, *гц*	$\varkappa$ для материалов								
	Э35 (ХВП)					50Н		80НХС	
	при толщине, *мм*								
	0,2	0,15	0,08	0,05	0,02	0,15	0,05	0,1	0,02
400—1500	1,7	1,6	1,55	1,2	1,2	1,4	1,15	1,75	1,2
1500—5000	1,7	1,6	1,55	1,4	1,3	1,5	1,2	1,75	1,3
Свыше 5000	1,7	1,6	1,6	1,6	1,4	1,6	1,4	1,75	1,4

Для приближенных расчетов при применении холоднокатаной стали можно принимать $\varkappa = 1,5$, т. е.

$$p_i' = f^{1,5} = \sqrt{f^3}\,. \qquad (4)$$

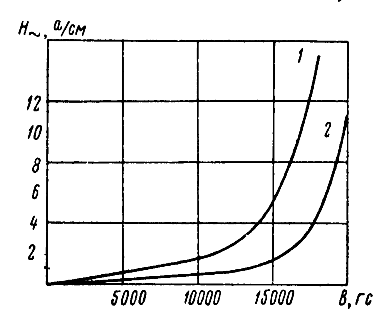


Рис. 45. Кривые намагничивания холоднокатаной стали Э330 0,35 *мм* на переменном токе. Частота 50 *гц*.

1 — поперек проката; 2 — вдоль проката.

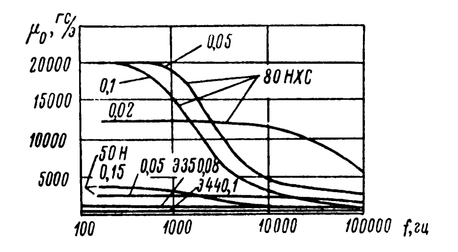


Рис. 46. Зависимость начальной магнитной проницаемости различных магнитных материалов от частоты

Однако достоверные результаты можно получить только определением потерь на данной частоте. По величине потерь для каждой частоты существует оптимальная толщина материала. Применение более тонкого материала может не дать снижения потерь, но привести даже к их росту. Происходит это потому, что с уменьшением толщины наряду со снижением потерь на вихревые токи растут потери на гистерезис. Суммарные потери достигают минимума при некоторой определенной толщине. На рис. 48 приведена зависимость потерь от толщины при постоянных индукциях для холоднокатаной ленточной стали Э35 и сплава 50Н.

Проведенные исследования позволили определить оптимальные толщины материалов для различных частот. Выбирая

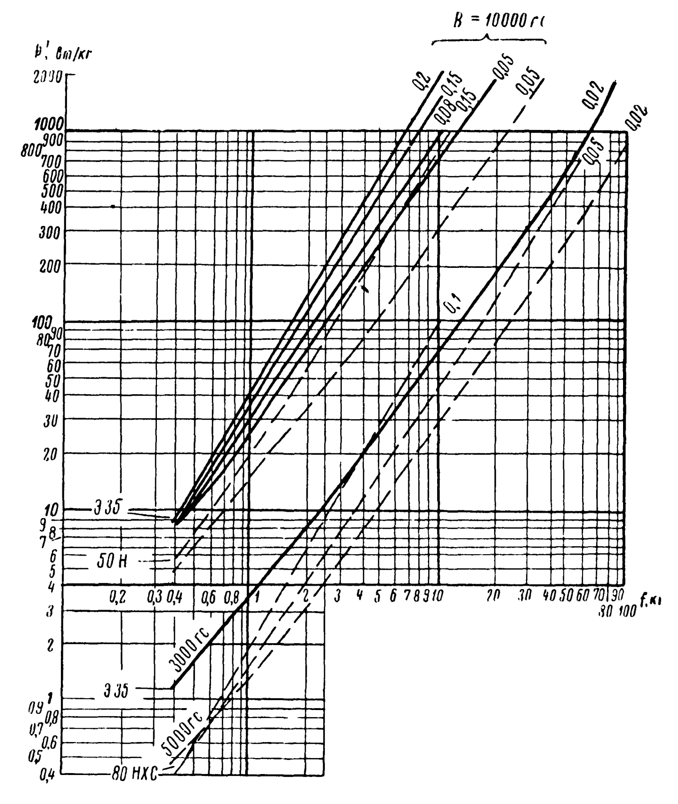


Рис. 47. **Зависимость удельных потерь различных магнитных материалов от частоты.**

——— — холоднокатаная сталь Э35 (ХВП),

- - - - — железоникелевые сплавы.

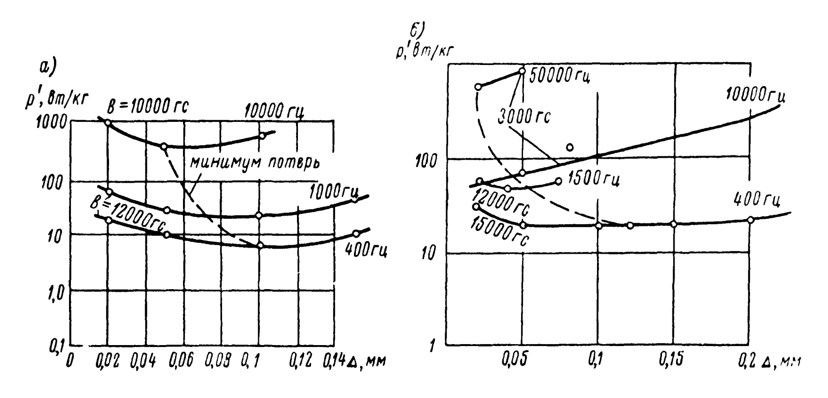


Рис. 48. **Зависимость удельных потерь магнитных материалов от толщины при различных частотах:** *а* — сплав 50Н; *б* — сталь Э35 (ХВП)

Таблица 7

Рекомендуемые толщины магнитных материалов для различных частот

Материал	Рекомендуемые для применения толщины, *мм*							
	Частота, *гц*				Импульсные трансформаторы при длительностях импульса,* *мксек*			
	50	400—500	1000—2500	2500—100000	>1	0,5—1	0,25—0,5	<0,25
Э41—Э43	0,35—0,5	—	—	—	—	—	—	—
Э44	—	0,1—0,2	0,1	0,1	0,1	—	—	—
Э34—Э36 (ХВП)	0,2—0,5	0,15—0,2	0,05—0,1	0,02—0,05				
50Н; 3СТА	0,35; 0,5	0,1	0,05—0,1	0,05				
80НХС; 79НМ; 33НКМС	0,35; 0,5	0,1	0,05	0,02—0,05	0,05—0,1	0,04—0,08	0,02—0,08	0,01—0,03
50НХС; 79НМА; 38НС	—	—	—	—				

* Данные ориентировочные.

толщину материала, следует учитывать также, насколько важно иметь минимальные потери в сердечнике. Например, для т. м. м. на частоту 50 *гц* потери в сердечнике начинают играть существенную роль только при больших мощностях — свыше 300—1000 *ва*. В то же время сердечник из тонкого материала дороже. С учетом сказанного, ориентируясь на освоенную отечественной промышленностью номенклатуру, приводим в табл. 7 оптимальные толщины различных материалов для использования на различных частотах. Первой в каждой графе поставлена толщина, предпочтительная для трансформаторов больших, второй — для трансформаторов меньших мощностей. Прочерки в графах означают нежелательность применения данного материала на соответствующих частотах.

Заметим, что на практике для т. м. м. на частоту 400—500 *гц* широкое распространение получила холоднокатаная сталь толщиной 0,08 *мм*. Как видно из приведенных по результатам исследований характеристик и из табл. 7, это ничем не оправдано.

Без всякого ущерба для качества можно перейти к гораздо более дешевым и технологичным сталям толщиной 0,15—0,2 *мм*. Такой переход и осуществляется в настоящее время.

Дополнительно к данным табл. 7 напомним, что для трансформаторов высокой частоты наиболее рационально применение магнитодиэлектриков и особенно ферритов. Применение первых выгодно в тех случаях, когда при невысокой величине магнитной проницаемости требуется ее независимость от величины индукции.

Важно подчеркнуть, что при частотах вплоть до 100 *кгц* удельные потери ферритов выше, чем у лучших никелевых сплавов при малой толщине, и лишь при частотах 200—300 *кгц* и более потери у ферритов становятся меньшими.

§ 6. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для современных т. м. м. используют изоляционные материалы всех классов нагревостойкости. Нагревостойкость, т. е. способность непрерывно работать при данной температуре в течение ряда лет, определяется по ГОСТ 8865—58 следующими данными:

Класс нагревостойкости	*A*	*E*	*B*	*F*	*H*	*C*
Длительная рабочая температура, °C	105	120	130	155	180	>180

Во многих случаях данный материал с различными пропитывающими составами может относиться соответственно к различным классам нагревостойкости. При меньшей, чем несколько лет, продолжительности службы данный материал может работать при более высокой температуре.

Из используемых материалов для слоевой и межобмоточной изоляции т. м. м. бумаги наиболее дешевы и широко распространены. Они обладают хорошей электропрочностью, но уступают другим материалам по механической прочности. Все бумаги относятся к классу нагревостойкости *А* (после пропитки). Из бумаг применяются: кабельная марки К, телефонная КТН, пропиточная ИП, крепированная, намоточная, микалентная, конденсаторная (КОН I и КОН II). Последняя наиболее качественна.

Из тканевых материалов применяются: в качестве изоляции класса *А* лакоткани на хлопчатобумажной основе — светлая ЛХ, черная ЛХЧ и на шелковой основе — ЛШ, ЛШС; в качестве изоляции классов *В, F, Н* — стеклоткань, стеклолента, стеклолакоткань, класса *Н* — стекломикалента и др.

Из пленочных материалов, приходящих на смену традиционным бумагам, используют: триацетатную пленку (класс *А*), высокопрочную механически полиэтилентерефталатную пленку лавсан (класс *Е*), пленку фторопласта-4 (класс *С*). Обладая повышенной влагостойкостью и теплостойкостью, пленки позволяют одновременно снизить толщину изоляции. Следует иметь в виду, что конструкции, использующие пленки, плохо пропитываются. Недостатком пленок является также их плохая адгезия к компаундам.

Из материалов, применяемых для сборных каркасов, текстолит не должен использоваться в условиях повышенной влажности. Для прессованных и литых каркасов применяют пресс-порошки К-21-22, К-114-35, К-211-3, ФКПМ-15 и др., литьевые материалы на основе полиамидных смол (поликапролактам, продукт № 68), в качестве изоляции классов *В, F, Н* — стеклотекстолит СТК, СВФЭ, СКМ-1, классов *С, Н* — термостойкие пресс-порошки АГ-4, К-41-5. Недостатком пресс-порошков марок К является недостаточная стабильность их свойств, а полиамидных каркасов — появление с течением времени хрупкости, что в ряде случаев недопустимо.

Для создания изоляционной среды в герметизированных высоковольтных трансформаторах кроме обычного трансформаторного масла перспективны кремний-органические и фтор-органические жидкости, а из инертных газов — азот и элегаз (шестифтористая сера).

Для пропитки и обволакивания используют лаки и компаунды: для изоляции классов *А, Е, В* — масляно-битумные лаки № 447, 458 и 462, маслостойкий глифтале-масляный лак № 1154; новые прогрессивные материалы — водноэмульсионный лак № 321-Т, полиэфирные компаунды МБК (класс *А, Е*), КГМС (класс *Е*), эпоксидные компаунды на основе смол ЭД-5, ЭД-6, Э-37 (классы *В, Е*). Для изоляции классов *F* и *Н* применяют кремний-органические лаки ЭФ-3БСУ, К-47, К-55, К-57. Эти

лаки отличаются очень высокими качествами, в частности, высокой влагостойкостью. Из них лак ЭФ-ЗБСУ наименее дефицитен, но несколько менее нагревостоек.

Наиболее распространенным пропиточным лаком является лак № 447. Однако в последние годы он интенсивно вытесняется водноэмульсионным лаком, который не требует дорогостоящих, токсичных и пожароопасных растворителей, не воздействует на эмаль обмоточных проводов и хорошо цементирует катушки. Недостатком его является несколько худшая влагостойкость. Этого недостатка лишены новые термореактивные алкидные лаки ФЛ-98 (АРБ-1) и АФ-17, обладающие всеми достоинствами лака 321-Т. Кроме того, они хорошо высушиваются по всей толщине катушки. Особенно перспективным для широкого применения следует считать лак ФЛ-98, являющийся достаточно дешевым. Однако этот лак вредно действует на эмаль проводов ПЭВ и с ними применяться не должен. Начинает успешно применяться для пропитки лак 100АСФ (ВТУ КУ 393-54), отличающийся хорошими свойствами и особой дешевизной. Пропитанные им катушки обладают повышенной теплоотдачей, тропикоустойчивы. Лак, однако, воздействует на эмаль проводов. Перечисленные материалы могут работать по классу *В*, а кратковременно (до 1000 час.) — при 150° и даже выше.

Высокое качество пропитки обеспечивают компаунды КГМС, МБК и особенно эпоксидные. Исключительно перспективными представляются новейшие компаунды КП-10 и КП-18, разработанные под руководством советского специалиста А. К. Варденбурга. Это диметакриловые эфиры, смешанные с полиэфирной смолой, являющейся продуктом конденсации малеинового и фталевого ангидридов с этиленгликолем и касторовым маслом. Компаунды употребляются в готовом виде (вязкость 30—60″ по ВЗ-4). Они обладают высокой электропрочностью, способностью чрезвычайно быстро просыхать в толстом слое, высокой цементирующей способностью. Теплостойкость — как у алкидных лаков. Влагостойкость компаундов изучается. Тропикоустойчивость пропитанных компаундами катушек может быть обеспечена специальными покрытиями. По совокупности свойств предпочтение может быть отдано компаунду КП-10.

В качестве нагревостойкого (до 200°) и морозостойкого пропиточного компаунда разработан стирольно-кремний-органический компаунд К-33. Для пропитки катушек из алюминиевой фольги может применяться кремний-органический лак КМ-17.

Наружное покрытие трансформаторов осуществляют покровными лаками (100АСФ, СБ-1с, 976-1 и др.) и различными эмалями, например серыми эмалями воздушной сушки СВД или печной сушки СПД, кремний-органическими эмалями ПКЭ, эпоксидными эмалями Э-4071, ОЭП-4171-1 и др. Последняя (не-

прозрачная) заметно усиливает лучеиспускание с поверхности катушек.

Заливочные компаунды используют с различными наполнителями — пылевидным кварцем, маршалитом, тальком, слюдяной мукой, окисью алюминия и др., иногда вводят небольшие добавки стекловолокна. Наполнитель удешевляет компаунд, повышает его теплопроводность, улучшает технологические свойства, снижает величину коэффициента линейного расширения, способствуя повышению стойкости конструкции против растрескивания, но несколько снижает его электрическую прочность. Для пропитки применяются компаунды без наполнителя.

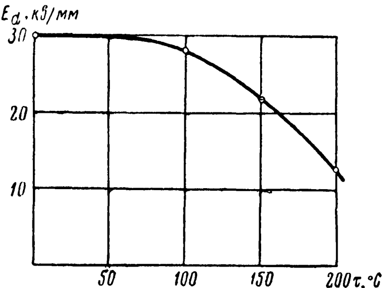


Рис. 49. Зависимость пробивной электрической прочности эпоксидного компаунда от температуры.

Хорошими свойствами обладают эпоксидные компаунды: высокой адгезией к большинству материалов, малой усадкой (1—2%), хорошей склеивающей способностью. Высоки и их электрические свойства. Компаунды химически-, бензо-, масло- и влагостойки и наряду с электропрочностью обеспечивают надежную герметизацию катушек.

Для высоковольтной изоляции наиболее пригодны компаунды на смолах Э-37, ЭД-6, чешской Э-2000. На смоле Э-37 выпускаются компаунды КЭП-1 и наиболее качественный — КЭ-2.

На рис. 49 приводится зависимость электрической прочности одного из эпоксикомпаундов от температуры. Можно видеть, что достаточно высокая прочность сохраняется вплоть до температур 150—200°, при которых можно использовать компаунд в течение десятков и сотен часов. Длительно с соответствующими наполнителями эпоксикомпаунды могут использоваться в классе *B*. Однако полностью исходные свойства (в рабочем состоянии изоляции) сохраняются до 105—110°. По зарубежным данным созданы эпоксидные компаунды, работающие при 150° в течение 10 000 час.

Имеется положительный опыт использования эпоксидных компаундов при повышенных и ультразвуковых частотах, однако вопросы электропрочности и изменения других характеристик в этих условиях еще мало изучены. По предварительным данным надежная работа эпоксидной изоляции на ультразвуковых и близких к ним частотах возможна лишь в импульсных режимах или при пониженных температурах.

Эпоксидные компаунды легко комбинируются с различными материалами, приобретая весьма разнообразные свойства. На-

пример, в смеси с кремний-органической смолой они обеспечивают высокую нагревостойкость (обволакивающий компаунд ЭК-20 и др.).

Недостатками эпоксидных компаундов являются токсичность, большие усилия усадки и известная трудность обеспечения морозостойкости в конструкции. Тем не менее удается получить трансформаторы с залитыми катушками, выдерживающие температуры —50° и даже —60°. Ведутся работы по созданию эластичных эпоксикомпаундов.

Большей эластичностью и меньшей токсичностью обладает компаунд МБК. Его свойства близки к свойствам эпоксикомпаундов, но при температурах 90—120° начинается (без потери конфигурации и электрических свойств) заметное механическое размягчение компаунда. Кроме того, МБК не стоек по отношению к маслу и бензину, а при заливке — и к канифоли. Этот компаунд химически активнее, чем эпоксидные, и вредно действует на ряд проводов и материалов, совместно с которыми не может применяться: провод ПЭЛ, резины, лакоткань, клей БФ и ряд других.

С точки зрения лучшего сочетания в отношении коэффициента линейного расширения, который составляет для эпоксикомпаундов с наполнением около 30×10^{-6}, а для МБК — 50×10^{-6}, наиболее подходящими для применения в конструкциях с заливкой являются детали из пресс-порошков и теплостойкого оргстекла.

В последнее время разработан стирольный пропиточно-заливочный компаунд КИ, обладающий совокупностью высоких свойств, близких по многим показателям к свойствам эпоксидных компаундов, но значительно более эластичный и обеспечивающий лучшую пропитываемость волокнистой изоляции. Однако его компоненты взрывоопасны. Некоторое распространение для заливок получил в первое время после появления полиэфирный компаунд КГМС, однако в конструкциях он сильно подвержен растрескиванию.

В настоящее время ведется интенсивная работа по созданию новых заливочных компаундов, удовлетворяющих разнообразные требования. Среди вновь разработанных компаундов — Т-58, АФ, К-30, К-31, РГЛ-450, КГМС холодного отверждения и др. Перспективными для применения на повышенных частотах могут оказаться стирольные компаунды КС, обладающие высокими электрическими свойствами.

Для герметизации (влагозащиты) и защиты от грибковой плесени применяют эпоксидо-полиэфирные компаунды К-168, К-293. Для лакировки пластин магнитопровода применяют бесцветный нитролак, бакелитовый лак и теплостойкие кремний-органические лаки К-47 и К-71.

Для выполнения различных бандажей и разделки концов

при намотке катушек применяют нитки хлопчатобумажные, шелковые, капроновые, а для теплостойкой изоляции — стеклянные. Для изоляции выводных концов применяют трубки линоксиновые марок А, Б, Н, П (электропрочность 300 *в*), резиновые, полихлорвиниловые (по ТУ МХП 1357—47), а в качестве теплостойкой и тропикоустойчивой изоляции — стеклолакочулки АСЭ-4 (по ТУ МЛП 1503—48) и ТКС (по ВТУЭИ 1-58).

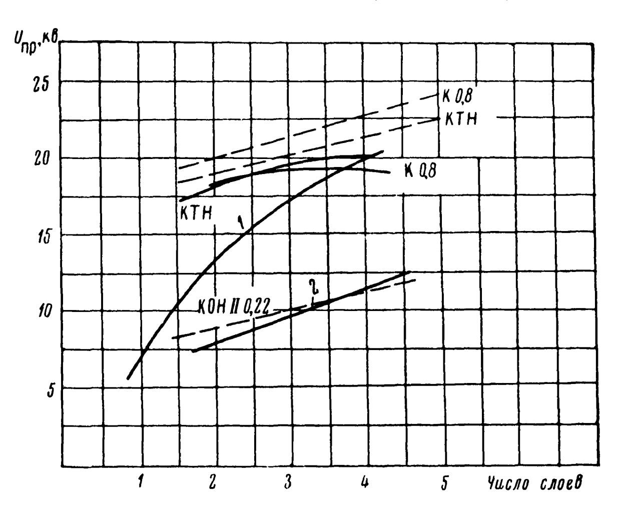


Рис. 50. Зависимость пробивного напряжения бумаг и стеклоткани с пропиткой эпоксидным компаундом от числа слоев при температуре 105° (для стеклоткани — при 150°)

—— — для образцов тороидальных;
----- — для образцов с прямоугольными катушками;
1 — стеклоткань 0,1 *мм*; *2* — микалентная бумага 0,03 *мм*.

Электропрочность стеклочулков в исходном состоянии составляет 4 *кв*, а после нескольких перегибов — 1 *кв*.

Для трансформаторов жаростойкого исполнения (500°) лучшие результаты в качестве основной изоляции показывают слюда и слюдяная бумага. Эти материалы достаточно стойки и по отношению к радиоактивному облучению. Интересен заменяющий слюду тонколистовой эластичный материал минерального происхождения палигорскит, испытанный в США на температуру до 900°.

Основные характеристики изоляционных материалов с указанием ГОСТ или ТУ приведены в табл. 8 и 9. E_d в таблицах дается в действующих значениях. В дополнение к данным таблицы на рис. 50 приведена зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ бумаг и стеклоткани, пропитанных эпоксидным компаундом, от числа слоев материала. Пользуясь таблицами

Свойства бумаг, пленок,

Материал					Электри	
Вид	Название	Марка	ГОСТ (Г) или ТУ	Толщина, *мм*	ρ_v, *ом·см*	Класс нагревостойкости
Бумага	Кабельная	К	Г 645—59	0,08; 0,12; 0,17	—	
	Телефонная	КТН	Г 3553—60	0,05	—	С пропиткой—класс *А*
	Конденсаторная	КОН II	Г 1908—57	0,005; 0,01; 0,012; 0,015; 0,022	—	
	Микалентная	—	Г 6500—53	0,02	—	
	Пропиточная	ИП	Г 3441—55	0,09; 0,11; 0,13	—	
	Электрокартон	ЭВ, ЭВТ	Г 2824—56	0,1—3	—	
	Пленкоэлектрокартон	—	ВТУ МЭП ОАА 503-002-52	0,16; 0,2; 0,3; 0,4	10^{17}	
Тканевые материалы	Лакоткань	ЛХ	Г 2214—46	0,15; 0,17; 0,2; 0,24; 0,3	10^{11}—10^{12}	*А*
	То же	ЛХЧ	Г 2214—46	0,2; 0,24; 0,17	10^{12}	*А*
	» »	ЛШ-2	Г 2214—46	0,08; 0,1; 0,12; 0,15	10^{12}	*А*
	» »	ЛШ-1	Г 2214—46	0,08; 0,1; 0,12; 0,15	10^{12}	*А*
	Ленты хлопчатобумажные	—	Г 4514—48	0,12; 0,16; 0,22	—	*А*
	Стеклоткань	—	Г 8481—57 ВТУ 215-53	0,025; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1	10^{15}	*F*, *H*, *C*

Таблица 8

тканей и твердой изоляции

ческие свойства						
Пробивная электрическая прочность E_d, *кв/мм*				Тропикоустойчивость	Специальные свойства	
При толщине, *мм*	В исходном состоянии	После перегиба	При других условиях испытаний			
0,16	20	4	После пропитки эпоксикомпаундом, 100 в конструкции при температуре 100° 170 (поперек слоев)	Только со специальными пропитками	Пропитывающая способность в числе слоев по Г 2256—43	2
0,1	30	5				3
0,044	50	30	—			1
—	—	—	То же (поперек слоев) 150 » » (вдоль ») 5,5			250
0,036	5	4	» » (поперек ») 44 » » (вдоль ») 7			50
0,3	11	8	—			—
0,2	20	14	—			—
любой	>5	4	После растяжения по диагонали 4	Нет	Водопоглощаемость за 24 час. 10%	
»	>10	9	После растяжения по диагонали 7,5	»	То же за 24 час. 10%	
»	>6	5	После растяжения по диагонали 11	»	То же за 24 час. 8%	
»	>28	20	После растяжения по диагонали 11	»	То же за 24 час. 8%	
—	—	—	—	»	—	
—	4	—	—	Да	Хорошая пропитываемость	

Материал					Электри	
Вид	Название	Марка	ГОСТ (Г) или ТУ	Толщина, *мм*	ρ_v, *ом·см*	Класс нагрево-стойко-сти
Тканевые материалы	Стеклолента липкая	—	ВТУ МЭСЭП ОАА 503-004-53	0,12; 0,15	10^{11}	*H*
	Стекло-лакоткань	ЛСЭ-1	—	0,15; 0,17; 0,2; 0,24	10^{13}	*A*
	То же	ЛСК-7	ВТУ МЭП ОАА 503-022-53	0,11; 0,15	10^{12}	*F, H*
	Резино-стекло-лакоткань	РСЛК-1	ВТУ ВЭИ 19	0,11; 0,15; 0,2	10^{14}	*H*
	Стекломикаленга	ЛС2ФК	ТУ ОИИ 503-057-54	0,13; 0,15; 0,17; 0,22	10^{12}	*H*
Пленки	Триацетатная	—	ТУ 16-76	0,025; 0,04; 0,07	10^{14}	*A*
	Лавсан	—	Не стандартизован		10^{14}	*E*
	Фторопласт	Ф-4	ТУМ 549-56	0,01—0,1	10^{15}	*C*
Твердая изоляция	Гетинакс	В, $А_в$, $В_в$, $Г_в$	Г 2718-54	От 0,2 и выше	10^{11}	*A, E*
	Текстолит	А, ВЧ	Г 2910-54	» 0,5 » »	10^{9}	*A, E*
	Стеклотекстолит	СТ	Г 2910-54	» 0,5 » »	10^{9}	*B*
	То же	СТК-41	ТУ ОЭПП 503-059-58	» 0,5 » »	10^{12}	*H*
	Оргстекло	СТ-1	ТУ БУ 11-57	» 2 » »	10^{14}	*A, E*

Примечания. 1. ε и $\operatorname{tg}\delta$ даются при частоте 50 *гц*.
2. Электропрочность E_d при рабочей температуре снижается на 10—50% против значений

ческие свойства				Тропико-устойчивость	Специальные свойства
Пробивная электрическая прочность E_d, *кв/мм*					
При толщине, *мм*	В исходном состоянии	После перегиба	При других условиях испытаний		
любой	>5	—	—	Да	
»	>28	24	После растяжения по диагонали 16	»	Водопоглощаемость 3%
»	>22	16	После перегиба при 180° 12	»	Сопротивление разрыву 5 *кГ/мм*²
»	>20	20	При температуре 200° 20	»	Сопротивление разрыву 5 *кГ/мм*²
»	>10	—	При температуре 200° 15	»	Сопротивление разрыву 7 *кГ/мм*²
любой	100	—	—	Нет	$\varepsilon = 3$; $tg\delta = 0{,}01$
»	170	—	—	Да	$\varepsilon = 3{,}5$; $tg\delta = 0{,}008$
»	30	—	—	»	$\varepsilon = 2$; $tg\delta = 0{,}0003$
1—3	33—25	—	После воздействия 70° 16—13	Нет	$\varepsilon = 7$; $tg\delta = 0{,}04$; марка Г — влагостойкий, В — для высоких частот
>2	6,5	—	После воздействия 70° 5—3,5	»	Марка ВЧ — для высоких частот
⩾2	10		После воздействия 70° 10	Да	Прочность на растяжение 400 *кГ/см*²
1	12—8	—	—	»	$\varepsilon = 4$; $tg\delta = 0{,}012$, прочность на растяжение 1000 *кГ/см*²
1—2	20	—	—	»	$tg\delta = 0{,}05$

при нормальной температуре.

Вид	Материал			Электрические	
	Название	Марка	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	ρ_v, *ом·см*
Заливочные компаунды	Эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД-6	Д-2	ЭД-6 по ВТУ М 646-55	*E*; *B*	7×10^{14}
	Эпоксидно-полиэфирный компаунд на основе смолы Э-37	КЭП-1	Э-37 по ВТУ МХП П-47—57	*E*; *B*	10^{14}
	Полиэфирный компаунд	МБК	ТУ ЭП 51-1-56	*A*; *E*	10^{13}
Пропиточные материалы	Компаунд	КГМС	ТУ МЭП ОАА 504-010-53	*E*	10^{14}
	Масло трансформаторное	—	Г 982—43	*A*	4×10^{14}
	Масляно-битумный лак	№ 447	Г 6244—52	*A*; *E*; *B*	—
	То же	№ 458	Г 6244—52	*A*	—
	Масляно-глифталевый лак	№ 1154 (ГФ-95)	Г 8018—56	*A*; *E*; *B*	—
	Водноэмульсионный лак	№ 321-Т	ВТУ КУ 364-54	*A*; *E*; *B*	10^{14}
	Полиэфирный компаунд	КП-10	ТУ ОАБ 504-017	*A*; *E*; *B*; *F*	10^{11}
	Алкидный лак	АРБ-1 (ФЛ-98)	ВТУ КУ 506-57	*A*; *E*; *B*	10^{14}
	То же	АФ-17	ВТУ КУ 506-57	*A*; *E*; *B*	10^{13}
	Кремний-органический лак	ЭФ-3	ТУ МХП 2300-57	*F*; *H*	10^{14}

Таблица 9

прессовочных материалов и газов

Свойства в нормальных условиях				Тропикоустойчивость	Специальные свойства
При 50 *гц*		Пробивная электрическая прочность E_d			
ε	tgδ	при толщине, *мм*	E_d, *кв/мм*		
3—4,5	0,003	2	25—30	Да	Морозостойкость в конструкции —60°
6	0,03	1	40—50	»	Морозостойкость —40°
5	0,08	1—15	>13	»	То же —60°
6	0,04	1	>18	Да	Морозостойкость —60°
2,5	0,001	2	6	Нет	Гигроскопично
—	—	В пленке	55	Да, при условии покрытия катушек тропикоустойчивыми эмалями	Достаточно влагостоек
—	—	То же	55		Меньшая нагрево- и влагостойкость
—	—	»	55		Маслостоек
2,5	0,06	0,3	>30		Пожаро- и взрывобезопасность
3,7—5	0,02	1	⩾20		Быстрая сушка
—	—	В пленке	70	Да	Хорошая просыхаемость
—	—	То же	60	»	То же
—	—	»	60	»	Влагостоек

Вид	Материал			Электрические	
	Название	Марка	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	ρ_v, *ом·см*
Пропиточные материалы	Кремний-органический лак	К-47	ВТУ МХП М-658-55	*F*; *H*	10^{12}
	То же	К-55	ТУ КХЗ 12-56	*F*; *H*	10^{13}
	» »	К-57	ТУ ВЭИ 26-57	*C*; *H*	10^{13}
Газы	Воздух	—	—	Любой	—
	Азот	—	—		—
	Элегаз	—	—		—
Пресс-материалы	Пресс-порошок (фенольный)	К-21-22 (Э-2)	Г 5689—60	*E*	5×10^{12}
	То же	К-114-35 (ВЧ-2)	Г 5689—60	*E*	5×10^{13}
	» »	К-41-5	ВТУ МХП 4386-55	*H*; *C*	10^{10}
	Пресс-материал (стекловолокно)	АГ-4	ОМТУ 431-57	*H*; *C*	10^{13}
	Смола полиамидная (гранулы)	№ 68	ТУМ-617 57	*A*	10^{14}
	Полиэтилен (крошка)	ПЭ	ВТУ МХП 4138-55	*A*	10^{16}
	Фторопласт-4 (крошка, гранулы)	—	ТУ МХП М 162-54	*C*	10^{16}

Примечания. 1. Электропрочность E_d при рабочей температуре снижается на 10—30%,
2. Для пресс-материалов E_d дана при испытании в конструкции, для газов—
3. Кремний-органические лаки могут кратковременно (до 500 час.) работать
4. Для пропитки могут применяться также заливочные компаунды без

свойства в нормальных условиях				Тропико-устойчивость	Специальные свойства
При 50 *гц*		Пробивная электрическая прочность E_d			
ε	tg δ	при толщине, *мм*	E_d, *кв/мм*		
—	—	В пленке	60	Да	Влагостоек
—	—	То же	50	»	»
—	—	»	50	»	»
1	—	5	0,6	—	—
1	—	5	0,6	—	—
1	—	5	2	—	—
8	0,09	4	13	Нет	Предел прочности при статическом изгибе 6 *кг/мм²*
5	0,01	4	16	Да	То же
—	—	4	2	»	» »
5	0,03	4	15	»	Высокая механическая прочность
3,5	0,04	2	22	Нет	Хорошие литьевые качества
2	0,0002	1	40	Да	Материал высокочастотен, влагостоек
2	0,0003	Любой	25	Да	Материал высокочастотен, влагостоек

у лаков на 50% против значения в нормальных условиях.
при электродах плоскость—стержень.
при 250—300°.
наполнителя.

и кривыми, не следует забывать, что при практическом использовании материалов в конструкции необходимо сохранять известный запас электропрочности. Коэффициент запаса в зависимости от условий составляет 1,5—3. Для эпоксикомпаундов и компаунда МБК, например, толщину слоя заливки надо выбирать из расчета 2,5—8 *кв/мм* в зависимости от толщины изоляции, рабочей частоты, температуры, срока службы.

§ 7. ПРОВОДА И ИХ ИЗОЛЯЦИЯ

Хотя в последнее время в Чехословакии создан новый проводниковый материал яреал, обладающий электропроводностью алюминия и механическими свойствами меди, последние являются единственными материалами, находящими практическое применение для обмоток т. м. м. Приводим их основные данные:

	Удельный вес, *г/см*³	Удельное сопротивление $\rho_{20°}$, *ом·мм*²/*м*
Медь	8,8	0,017
Алюминий	2,7	0,028

Толщина применяемой алюминиевой фольги — от 10 до сотен микронов. Изолируется она тонкой оксидной пленкой (2—4 *мк*). Оксидная изоляция жаростойка, теплопроводна, выдерживает напряжение до 100 *в* и выше. Ее недостатки — ограниченная эластичность и гигроскопичность. Для ликвидации последней разрабатываются специальные меры.

Применяемые для т. м. м. марки медных изолированных проводов с указанием областей их применения, ГОСТ и ТУ приведены в табл. 10. В табл. 11 приведены стандартные размеры и сечения проводов, а в табл. 12 — толщина их изоляции.

При выборе проводов для верхнего диапазона повышенных частот и выше следует иметь в виду возможное увеличение активного сопротивления r из-за поверхностного эффекта. Степень увеличения $\frac{r}{r_=}$ зависит от частоты f и диаметра провода (рис. 51). Глубина проникновения определяется приближенно как $\frac{70}{\sqrt{f}}$ *мм*. В катушках, особенно многовитковых и многослойных, возможно возрастание r также из-за эффекта близости. Из-за этих явлений применение на каждой частоте провода сверх определенного диаметра нежелательно.

Из всех типов проводов наибольшее распространение получили эмалированные провода, обладающие наименьшей толщиной изоляции и обеспечивающие достаточно высокую электрическую и механическую прочность. Они в значительной мере вытеснили провода с волокнистой изоляцией. Для работы при нормальных рабочих температурах преимущественное применение находят:

Таблица 10

Обмоточные провода для т. м. м. и их основные характеристики

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Эмалированные провода (кроме ПЭВП, — круглые)	ПЭЛ, ПЭЛУ	С лакостойкой масляной эмалью (У — утолщенная)	Г 2773—51	*А*	∅0,05—2,44	300—1250 450—1600	При отсутствии повышенных требований по надежности и требованиях малой стоимости (бытовая аппаратура)
	ПЭВ-1	С высокопрочной однослойной эмалью винифлекс или метальвин	Г 7262—54	*А*; *Е*	∅0,06—2,44	350—1400	При несколько повышенных требованиях по надежности
	ПЭВ-2	То же с двуслойной эмалью	Г 7262—54	*А*;*Е*;*В*	∅0,06—2,44	450—2000	При повышенных требованиях по надежности для малогабаритной аппаратуры
	ПЭВП	То же, прямоугольный провод	ВТУ МЭП 646-49	*А*; *Е*	0,5×2,83—1,95×4,4	175—250	То же при необходимости больших сечений и из конструктивных соображений
	ПЭЛР-1,2	С высокопрочной полиамидной эмалью (однослойной и двуслойной)	ТУК ОММ 505-073-54	*А*	∅0,10—2,44	500—1400; 700—2000	То же, что ПЭВ-1 и ПЭВ-2

Продолжение табл. 10

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Эмалированные провода	ПЭТ	Теплостойкий на глифталевой эмали	Г 2773—51	*B*	⌀0,05—2,44	300—1250	Для т. м. м. повышенной нагревостойкости при отсутствии требований по надежности
	ПЭТК	С нагревостойкой кремний- органической эмалью	ТУК ОММ 505-163-55	*F*, *H*	⌀0,02—0,51	200—1000	Для теплостойких малогабаритных трансформаторов
Провода с волокнистой изоляцией	ПБД	С изоляцией двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи	ГОСТ 6324—52	*A*	⌀0,2—5,2; 0,9×2,1—5,5××14,5	250—1000	Для реализации больших сечений при нормальных и повышенных частотах и отсутствии повышенных требований по надежности
	ППБО-1, -2	С изоляцией одним или двумя слоями обмотки триацетатной пленки и одним слоем обмотки хлопчатобумажной пряжи	ТУК ОММ 505-056-54	*A*	0,9×2,1—5,5××14,5	800, 1500	То же при большей надежности

Продолжение табл. **10**

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Провода с волокнистой изоляцией	ППТБО	То же с двумя слоями пленки, одним слоем пряжи и одним слоем телефонной бумаги	ТУК ОММ 505-056-54	*A*	0,9×2,1—5,5×14,5	4000	То же при высокой электропрочности
	ППКО-1, -2	То же с одним или двумя слоями обмотки из шелка капрон	ТУК ОММ 505-056-54	*A*	0,9×2,1—5,5×14,5	800, 1500	То же, что ППБО-1, ППБО-2 при требовании малой стоимости
	ПДА	С изоляцией слоем дельта-асбеста с подклейкой и пропиткой теплостойким лаком	Г 7019—54	*B*	⌀1—5,2; 0,9×2,1—5,5×10	400	Для реализации больших сечений провода у т. м. м. с нагревостойкостью по классу *B*
	ПСД	С изоляцией двумя слоями стекловолокна с пропиткой теплостойким лаком	Г 7019—54	*F*	⌀0,31—5,2; 0,9×2,1—5,5×10	550	Для т. м. м. с нагревостойкостью по классу *F* при повышенной надежности и отсутствии требований малых габаритов

Продолжение табл. 10

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Провода с волокнистой изоляцией	ПСДК	То же с пропиткой кремний-органическим лаком	ВТУ МЭП ОАА 505-024-52	*Н*	⌀0,31—5,2; 0,9×2,1—5,5×10	550	Для т. м. м. с нагревостойкостью по классу *Н*, при повышенной влажности, при необходимости реализации больших сечений провода при повышенной надежности и отсутствии требований малых габаритов
Провода с волокнистой изоляцией	ПЭЛБО, ПЭЛБД	С эмалью и одним или двумя слоями хлопчатобумажной пряжи	Г 6324—52	*А*	⌀0,2—2,1 ⌀0,72—2,1	250—1000	То же, что ПЭЛ, при повышенной механической надежности изоляции
Провода с волокнистой изоляцией	ПЭЛШО, ПЭЛШД	С эмалью и одним или двумя слоями шелка	Г 6324—52	*А*	⌀0,05—2,1	250—1000	При требовании повышенной механической прочности и отсутствии требований по дешевизне

Продолжение табл. 10

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Провода с эмалево-волокнистой изоляцией	ПЭЛШКО, ПЭЛШКД	С эмалью и одним или двумя слоями шелка капрон	Г 6324—52	*А*	⌀0,05—2,1	250—1000	То же, что ПЭЛШО(Д) при требованиях малой стоимости
	ПЭТСО	С эмалью и слоем стекловолокна с пропиткой теплостойким лаком	Г 7019—54	*Е*	⌀0,38—1,81	650	Для т. м. м. повышенной нагревостойкости при высоких требованиях по надежности
	ПЭТКСО	То же с пропиткой кремний-органическим лаком	ВТУ МЭП ОАА 505-023-52	*Н*	⌀0,35—1,56	500	Для теплостойких т. м. м. при высоких требованиях по надежности, влажности и для реализации больших сечений

Продолжение табл. 10

Характер изоляции	Марка провода	Характеристика провода	ГОСТ (Г) или ТУ	Класс нагревостойкости	Предельные размеры сторон сечения или диаметр, *мм*	Пробивное напряжение изоляции провода соответственно росту размеров, *в*	Применение
Провода с эмалево-волокнистой изоляцией	ЛЭШО, ЛЭШД	Многожильный гибкий провод с изоляцией каждой жилы эмалью и наружной оплеткой одним или двумя слоями шелка	ВТУ МЭП 743-50	*А*	10×⌀0,05—49×⌀0,2	—	Для т. м. м. ультразвуковой и высокой частоты и при больших сечениях при необходимости гибкости (обмотка замкнутых сердечников)
	ПЭЛВО	То же с лакостойкой эмалью и хлопчатобумажной оплеткой	ВТУ МЭП ОАА 505-070-53	*А*	37×⌀0,51—70×⌀0,8	—	То же для реализации больших сечений при отсутствии повышенных требований по надежности
	ПЭМВО	То же с высокопрочной эмалью	ВТУ МЭП ОАА 505-047-53	*А*	37×⌀0,51—70×⌀0,8	—	То же при повышенных требованиях по надежности

для аппаратуры народного потребления (радио- и телеприемников, гражданских установок связи и т. д.) провода ПЭЛ, для спецаппаратуры — провода ПЭВ-2. Провода ПЭВ тропикоустойчивы.

Из оплетенных проводов рядом ценных свойств обладают провода с обмоткой шелком капрон. Капрон значительно дешевле натурального шелка, имеет меньшую гигроскопичность, лучшую эластичность, устойчив против микроорганизмов и ряда химикатов, морозостоек. Однако его электрические свойства не очень высоки. Высокой электропрочностью отличаются провода, обмотанные триацетатной пленкой. Наиболее распространен из них провод ППТБО.

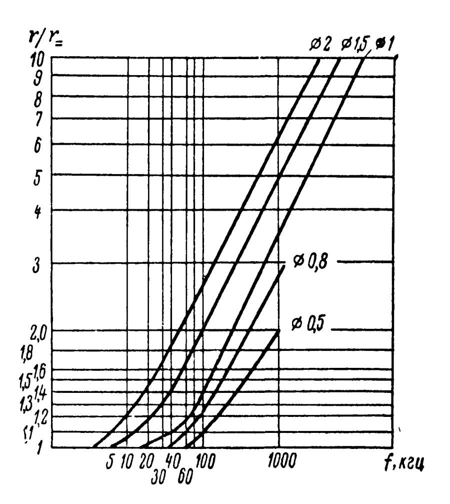


Рис. 51. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления переменному току от частоты для проводов различного диаметра.

Значительная работа проведена в СССР по разработке проводов с теплостойкой изоляцией. Теплостойкие провода, марки которых приведены в табл. 10, обладают, однако, известными недостатками: провод ПЭТК недостаточно бензиностоек, снижает свое пробивное напряжение после нагрева и в силу технологических затруднений не выпускается с большими сечениями; провода со стекловолокнистой изоляцией имеют значительную толщину изоляции. Поэтому в последнее время разработан ряд новых типов проводов. Получено несколько марок проводов со стеклоизоляцией существенно (в 1,5—2 раза) уменьшенной толщины. Это провода ПСД-Т, ПЭТСО-Т (по ТУК ОММ 505-190-56), ПСДКТ (по ТУ КП 18-58), ПЭТКСО-Т (по ТУ КП 19-58). Их рабочие температуры не отличаются от рабочих температур соответствующих проводов, приведенных в табл. 10. Кратковременно (несколько сот часов) провода класса *H* могут работать при температурах 250—350°. К числу новых относится провод с однослойной (особо тонкой) стеклоизоляцией класса *H* — ПСОТ (по ТУ КП 17-58).

Из эмалированных проводов высокой нагревостойкостью (при высокой надежности) обладают провода с эмалью на полиэфирных лаках. Их длительная рабочая температура 130—135°, кратковременно их можно использовать при температуре до 200°. За границей подобные провода получили название

Провода круглого сечения						
Диаметр, *мм*	Сечение, *мм*²	Диаметр, *мм*	Сечение, *мм*²	Диаметр, *мм*	Сечение, *мм*²	Ширина большей стороны, *мм*
0,05	0,0020	0,47	0,173	1,30	1,32	2,1
0,06	0,0028	0,49	0,188	1,35	1,43	2,26
0,07	0,0038	0,51	0,205	1,40	1,54	2,44
0,08	0,0050	0,53	0,220	1,45	1,65	2,63
0,09	0,0064	0,55	0,237	1,50	1,76	2,83
0,10	0,0079	0,57	0,255	1,56	1,91	3,05
0,11	0,0095	0,59	0,273	1,62	2,06	3,28
0,12	0,0113	0,62	0,301	1,68	2,21	3,53
0,13	0,0132	0,64	0,321	1,74	2,38	3,8
0,14	0,0154	0,67	0,352	1,81	2,57	4,1
0,15	0,0176	0,69	0,373	1,88	2,77	4,4
0,16	0,020	0,72	0,407	1,95	2,98	4,7
0,17	0,023	0,74	0,430	2,02	3,20	5,1
0,18	0,025	0,77	0,465	2,10	3,46	5,5
0,19	0,028	0,80	0,50	2,26	4,00	5,9
0,20	0,031	0,83	0,54	2,44	4,68	6,4
0,21	0,035	0,86	0,58	2,63	5,42	6,9
0,23	0,042	0,90	0,64	2,83	6,30	7,4
0,25	0,049	0,93	0,68	3,05	7,30	8,0
0,27	0,057	0,96	0,72	3,28	8,44	8,6
0,29	0,066	1,00	0,79	3,53	9,78	9,3
0,31	0,075	1,04	0,85	3,80	11,35	10,0
0,33	0,085	1,08	0,91	4,10	13,2	10,8
0,35	0,096	1,12	0,99	4,50	15,9	11,6
0,38	0,113	1,16	1,03	4,80	18,1	12,5
0,41	0,132	1,20	1,13	5,20	21,2	13,5
0,44	0,152	1,25	1,22	—	—	14,5

Таблица 11

голых обмоточных проводов

Провода прямоугольного сечения												
Сечение, *мм*²												
При ширине меньшей стороны (для принятых сочетаний размеров сторон), *мм*												
0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26
1,82	1,89	2,07	2,24	2,42	2,64	2,85	3,08	3,33	3,60	—	3,92	—
1,96	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	—	4,35	4,63
2,13	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64	—
2,30	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04	—
2,48	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46	5,92
—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	5,93
—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,3	5,73	6,19	6,41	6,93
—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,68	6,93	7,50
3,20	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,2	7,5	8,11
—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79
—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46
—	4,44	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,12	7,79	8,3	8,96	9,39	10,1
—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,88	7,19	7,75	8,37	9,02	9,74	10,2	11
—	5,29	5,73	6,16	6,67	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9
—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8
—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14
—	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14	15,1
—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15	16,2
—	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6
—	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9
—	—	—	—	—	12,4	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19	20,5
—	—	—	—	—	—	—	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,3	20,9	22,2	23,9
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,9	25,7
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,8	27,8
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Провода круглого сечения						
Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Диаметр, *мм*	Сечение, $мм^2$	Ширина большей стороны, *мм*
0,05	0,0020	0,47	0,173	1,30	1,32	2,1
0,06	0,0028	0,49	0,188	1,35	1,43	2,26
0,07	0,0038	0,51	0,205	1,40	1,54	2,44
0,08	0,0050	0,53	0,220	1,45	1,65	2,63
0,09	0,0064	0,55	0,237	1,50	1,76	2,83
0,10	0,0079	0,57	0,255	1,56	1,91	3,05
0,11	0,0095	0,59	0,273	1,62	2,06	3,28
0,12	0,0113	0,62	0,301	1,68	2,21	3,53
0,13	0,0132	0,64	0,321	1,74	2,38	3,8
0,14	0,0154	0,67	0,352	1,81	2,57	4,1
0,15	0,0176	0,69	0,373	1,88	2,77	4,4
0,16	0,020	0,72	0,407	1,95	2,98	4,7
0,17	0,023	0,74	0,430	2,02	3,20	5,1
0,18	0,025	0,77	0,465	2,10	3,46	5,5
0,19	0,028	0,80	0,50	2,26	4,00	5,9
0,20	0,031	0,83	0,54	2,44	4,68	6,4
0,21	0,035	0,86	0,58	2,63	5,42	6,9
0,23	0,042	0,90	0,64	2,83	6,30	7,4
0,25	0,049	0,93	0,68	3,05	7,30	8,0
0,27	0,057	0,96	0,72	3,28	8,44	8,6
0,29	0,066	1,00	0,79	3,53	9,78	9,3
0,31	0,075	1,04	0,85	3,80	11,35	10,0
0,33	0,085	1,08	0,91	4,10	13,2	10,8
0,35	0,096	1,12	0,99	4,50	15,9	11,6
0,38	0,113	1,16	1,03	4,80	18,1	12,5
0,41	0,132	1,20	1,13	5,20	21,2	13,5
0,44	0,152	1,25	1,22	—	—	14,5

П р и м е ч а н и е. Для отдельных марок провода из общей номенклатуры применяются по табл. 10.

Провода прямоугольного сечения											
Сечение, *мм*²											
При ширине меньшей стороны (для принятых сочетаний размеров сторон), *мм*											
2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	5,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,94	6,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,43	—	7,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	—	—	—	—	—	—	—
7,52	8,15	8,80	—	10,3	—	—	—	—	—	—	—
8,13	8,80	9,51	10,3	11,1	12	—	—	—	—	—	—
8,79	9,51	10,3	11,1	12,0	—	13,9	—	—	—	—	—
9,52	10,3	11,1	12	13	14	15,1	15,9	—	—	—	—
10,2	11,1	12,0	12,9	13,9	15	16,2	17,1	18,5	—	—	—
11	11,9	12,8	13,8	14,9	16,1	17,4	18,4	—	—	—	—
11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	17,5	18,9	20	21,5	—	25,1	—
12,9	14,6	15,1	16,3	17,5	18,9	20,4	21,7	23,3	25	27,2	—
13,9	15	16,2	17,5	18,9	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	29,2	—
15,1	16,3	17,6	19	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	31,7	34,3
16,3	17,7	19	20,6	22,1	23,9	25,7	27,4	29,5	31,5	34,3	37,1
17,6	19	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,8	39,8
19	20,5	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7	39,9	43,1
20,5	22,1	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,4	43	46,4
22,3	24	25,8	27,9	30	32,3	34,8	37,2	40	42,8	46,5	50,5
23,9	25,8	27,8	30	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1	50,1	54,1
25,9	27,9	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5
27,8	30	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9
30,0	32,4	34,9	37,6	40,5	43,6	47	50,4	54,1	57,9	62,9	67,9
32,4	35	37,7	40,7	43,8	47,2	50,8	54,5	58,2	62,6	68	73,4
34,9	37,6	40,5	43,7	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74	78,9

те или иные ограниченные зоны размеров, заключенные между крайними размерами

Таблица 12

Двусторонняя толщина изоляции проводов (округленно), ***мм***

Провода круглого сечения

Диаметры голого провода, *мм*	Эмалированные провода		Провода с волокнистой изоляцией			Провода с эмалево-волокнистой изоляцией				
	ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭЛР-1	ПЭЛУ, ПЭВ-2, ПЭЛР-2, ПЭТК	ПБД	ПСД, ПСДК	ПДА	ПЭЛШО, ПЭЛШКО	ПЭЛКО	ПЭЛБД	ПЭТКСО	ПЭТСО
0,05—0,09	0,02	0,03	—	—	—	0,07	—	—	—	—
0,1—0,15	0,022	0,033	—	—	—	0,075	—	—	—	—
0,15—0,21	0,03	0,04	0,19	—	—	0,075	—	—	—	—
0,23—0,33	0,04	0,05	0,20	0,23	—	0,09—0,105	0,125—0,16	—	0,16	0,2
0,35—0,49	0,04	0,06	0,22	0,23	—	0,11	0,165	—	0,16	0,2
0,51—0,69	0,05	0,07	0,22	0,25	—	0,115	0,17	—	0,16	0,2
0,72—0,96	0,06	0,09	0,22	0,25	—	0,125	0,18	0,28	0,18	0,22
1,0—1,45	0,08	0,11	0,27	0,27	0,3	0,135	0,21	0,33	0,20	0,22
1,5—2,1	0,09	0,12	0,27	0,27	0,3	0,135	0,21	0,33	—	0,22
2,26—5,2	0,10	0,13	0,33	0,33	0,35	—	—	—	—	—

Провода прямоугольного сечения

Размер меньшей стороны, *мм*	Эмалированные провода	Провода с волокнистой изоляцией				
	ПЭВП	ПДА	ПСД, ПСДК	ПБД, ППБО-1, ППКО-1	ППБО-2, ППКО-2	ППТБО
0,5—1	0,13	—	—	—	—	—
0,83—1,95	0,15	0,4	0,27	0,27	0,31	0,45
2,1—3,8	—	0,4	0,33	0,33	0,35	0,45
4,1—5,5	—	0,4	0,40	0,44	0,44	0,50

алканекс (США), теребек (ФРГ), терамел (Англия). В Советском Союзе разработаны провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ (ТУ КП 25-58) диаметром 0,06—2,44 *мм*. Эти провода по механической и электрической прочности не уступают высокопрочным эмальпроводам ПЭВ-2. Провод ПЭТВ-1 обладает повышенной стойкостью к тепловым ударам. Провода тропикоустойчивы.

Особо высокой теплостойкостью отличаются провода, изолированные эмалями на основе фторопласта-4 (рабочая температура до 250°). В СССР выпущены опытные партии таких проводов марок ПЭФ и ПЭФУ диаметром 0,51—1,4 *мм* и электрической прочностью эмали 1000—1800 *в*. Слой эмали, как и у проводов ПЭТВ, не толще, чем у проводов ПЭВ.

Дальнейшее повышение теплостойкости может быть достигнуто применением керамических эмалей и предохраненной от окисления меди, изолированной термостойкой стеклотканью. В США проведены опыты с использованием таких проводов при температуре 500°. Большие перспективы в повышении нагревостойкости открывает применение оксидированного алюминия. Все эти жаростойкие провода стойки и в отношении радиоактивного облучения. Сочетанием жаростойкости (до 600°), механической прочности, эластичности, влагостойкости отличаются изоляционные пленки, полученные за счет окисляющего действия на провод фтора или фтористого водорода.

Значительный интерес представляют эмальпровода на полиуретановых лаках, высокопрочные, теплостойкие, лудящиеся, марки ПЭВТЛ, класса изоляции *E* (кратковременный нагрев — до 150—180°). Эти провода обладают высокими качествами, эластичностью, хорошей влагостойкостью. Их оригинальным свойством является способность покрываться слоем олова без зачистки эмали и применения флюсов. Пайка таких проводов может производиться простым погружением в расплавленное олово.

Для намотки бескаркасных катушек можно применять новый эмальпровод с дополнительным термопластичным слоем — ПЭВД. Термопластичный слой (на базе термопластичных смол) запекается при температуре 170—180° и связывает катушку в единое целое.

Важную задачу представляет правильный выбор монтажных проводов для соединения концов обмоток с выводами трансформатора. Для этой цели применяются два основных вида проводов — с волокнистой лакированной изоляцией (по ТУ ТУКП 27-58) и с полихлорвиниловой изоляцией, снаружи оплетенной. Большинство монтажных проводов рассчитано на работу при температуре 70—90°. К таким проводам относятся: МГШДО и МГШДЛ с двойной обмоткой шелком, МГБДЛ с двойной обмоткой хлопчатобумажной пряжей (рабочее напряжение 250 *в*), МГВ в полихлорвиниловой изоляции, МГОВ с обмоткой волок-

нистыми материалами в полихлорвиниловой изоляции, МГШВ с двойной обмоткой шелком в полихлорвиниловой изоляции, МП с полиэтиленовой изоляцией (рабочее напряжение 380—1000 *в*). Все провода гибкие, многопроволочные. Провод МГШВ можно кратковременно использовать при температурах 100—130°.

Для повышенных рабочих температур (130—150°) можно применять провод МГЦСЛ с пленочной изоляцией в обмотке стекловолокном или асбестом и в оплетке стекловолокном с лакировкой кремний-органическими лаками и провод МГТН. Провода с волокнистой изоляцией можно применять лишь при нормальной влажности. При повышенной влажности следует применять провода с полихлорвиниловой и резиновой изоляцией. Провода РКГМ с изоляцией из кремний-органической резины могут работать при температурах до 180° и напряжениях до 380 *в* (ВТУ МЭП ОАА 505-027-53). Провод тропикоустойчив. То же относится к проводам БНТ-250.

Теплостойкостью до 200° обладает гибкий монтажный провод с фторопластовой изоляцией МГТФ (ТУ ОММ 505-014-58). Его рабочее напряжение 250 *в*, испытательное — 1 *кв*. Провод МГТФЛ имеет рабочее напряжение 500 *в*.

Повышение электроизоляционных свойств и теплостойкости монтажных проводов может быть достигнуто применением для изоляции полиэтилена повышенного качества (например, так называемого низкого давления).

Для осуществления внешних высоковольтных выводов (см. рис. 17, 18) можно применять гибкий влагостойкий резиновый провод ПВГ (ВТУ МЭП 243-51) с рабочей температурой до 80° и электрической прочностью не ниже 18 *кв*. Его недостатком является низкая озоностойкость и склонность к растрескиванию во времени. Для тех же целей можно использовать резиновые гибкие провода ПВРВ с испытательным напряжением 35 *кв* (по ТУ $\frac{\text{ЭЛ-3}}{\text{МГ}}$-003-58), ЛПЛ — 8 *кв* (по ВТУ НКЭП 346-44). При высокой температуре, до 250°, может быть использован провод ТМ-250 (ТУК ОММ 505-111-56), изолированный пленкой фторопласта и пропитанной стекловолокнистой оплеткой. Он обладает высокой влагостойкостью. Его пробивное напряжение 6000—10 000 *в*. Из-за отсутствия адгезии к компаундам и трудности вулканизации применять его в залитых катушках надо с осторожностью. Теплостойким является и фторопластовый провод ПВСТ в стеклянной оплетке, пропитанной кремний-органическим лаком, с испытательным напряжением 20 *кв* (по ТУК ОММ 505-205-57).

За рубежом созданы провода с фторопластовой изоляцией, отличающиеся высокой короностойкостью.

ГЛАВА IV

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

§ 8. СЕРДЕЧНИКИ ШТАМПОВАННЫЕ НАБОРНЫЕ

Ш-, П- и О-образные пластины штампуют на прессах. Прогрессивным является применение штампов с твердосплавными пластинками, у которых срок службы выражается числом 30 млн. пластин против 0,4 млн. у обычных штампов.

Пластины нештампуемые нарезаются на гильотинных ножницах. Штамповка или резка пластин практически возможны при толщине до 0,2 *мм* и, с известными трудностями,— до 0,1 *мм,* материалы меньших толщин для шихтованных сердечников применять невозможно.

После штамповки или резки с кромок пластин снимаются заусенцы и пластины проходят отжиг для снятия механического наклепа, снижающего магнитные свойства материала. Отжиг пластин из трансформаторных сталей производится в нагревательных печах при ограничении доступа воздуха (укупорка асбестом или песком с укладкой чугунной стружки и промазкой щелей огнеупорной глиной). Температура отжига 800—900° с выдержкой 3—4 часа. Охлаждение — со скоростью 50° в час.

Пластины из железоникелевых сплавов отжигают при более высокой температуре — желательно 1000—1200°. Наилучшее качество обеспечивается при отжиге в вакууме или водороде. Длительность отжига — 10—15 час., охлаждение — медленное с печью, в ряде случаев форсированное. Отожженные пластины из железоникелевых сплавов чувствительны к механическим напряжениям и требуют бережного обращения.

Для изоляции пластин магнитопровода друг от друга, с целью уменьшения вихревых токов, пластины покрывают изоляционным лаком (см. § 6). Прежде применялась также прокладка пластин тонкой папиросной бумагой. Прогрессивными методами изоляции пластин из трансформаторной стали являются фосфатирование и паровое оксидирование. Оксидирование ведется при 450—500°. Толщина слоя 5—8 *мк*. Фосфатирование осуществляется в ванне с кислотным марганцевым фосфатом при 96—98° и дает пленку толщиной 10—20 *мк*. Оба вида изолирования дают теплостойкую (до 150—200°), эластичную и влагостойкую пленку. Для железоникелевых пластин возможно оксидирование охлаждением на воздухе после нагрева на 600—700° в течение 0,5—2 час.

Отметим, что для т. м. м., работающих при частоте 50 *гц*, а при небольших индукциях — и при повышенных частотах, нанесение специальной изоляции на пластины не является обязательным. Достаточной оказывается та пленка окисла, которая

неизбежно покрывает пластины во время отжига и пребывания на воздухе. На рис. 52 приведены средние кривые потерь для 15 сердечников Ш-16—Ш-40 без специальной изоляции и для тех же сердечников после лакировки пластин. В отдельных случаях, при пониженных требованиях к качеству трансформатора, можно вести ускоренный отжиг без укупорки пластин или совсем отказаться от отжига.

Несмотря на принимаемые меры (зачистка заусенцев, отжиг), магнитные свойства материала в процессе обработки несколько ухудшаются. Например, потери возрастают на 15—20%, а в тонких материалах — до 30%. При исключении отжига эти цифры увеличиваются. Это следует учитывать при расчетах, принимая

$$p_i = к_p p_i'. \qquad (5)$$

Здесь p_i — удельные потери в сердечнике;

p_i' — удельные потери в исходном материале;

$к_p$ — технологический коэффициент увеличения потерь.

При отсутствии отжига возрастают и напряженности намагничивания $H_\sim$

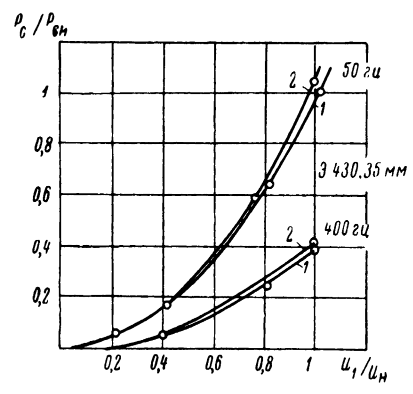


Рис. 52. Влияние изоляции пластин на потери шихтованных сердечников, сталь Э43, 0,35 *мм*.

1 — пластины лакированные; *2* — пластины нелакированные.

Способ изоляции пластин, так же как и их толщина и состояние поверхности, влияет на величину коэффициента заполнения сердечника $к_с$. Имеющие место практически величины $к_с$ приведены в табл 13.

Для штамповки Ш-, П-, О-образных пластин, как правило, применяют нетекстурованные материалы (железоникелевые

Таблица 13

Коэффициенты заполнения шихтованных пластинчатых сердечников

Толщина пластин, *мм*	Средние значения $к_с$			
	с изоляцией бумагой	с лаковой изоляцией	с фосфатной изоляцией	без специальной изоляции
0,5	0,89	0,94	0,96	0,97
0,35	0,85	0,91	0,94	0,95
0,2	0,77	0,85	0,89	0,91
0,1	0,6	0,7	0,75	0,8

сплавы и горячекатаные стали). В отдельных случаях для получения Ш- и П-образных пластин допустимо использование и холоднокатаных сталей. Однако при этом их свойства, ввиду наличия магнитной текстуры, не могут быть полностью использованы. Действительно, если, например, направление прокатки совместить с направлением стержней, то магнитный поток в ярмах окажется направленным не вдоль, а поперек проката, и наоборот. Хотя расчеты показывают, что в целом для трансформатора проигрыш не так велик (особенно при повышенных частотах), подобное использование текстурованной стали нельзя признать рациональным. Кроме того, штамповка такой стали вызывает усиленный износ штампов или требует определенных усложнений технологии.

Не позволяет полностью использовать свойства текстурованной стали и сборка магнитопровода из отдельных пластин, нарезанных вдоль текстуры. В частности, это обусловливается несовпадением направлений потока и текстуры в углах магнитопровода при изгибе магнитной линии. Как показывает опыт, потери в собранном сердечнике из холоднокатаной стали превышают потери материала на 30—50%. Для ослабления этого явления целесообразно делать торцовые края пластин скошенными на 45°. При этом заметно снижается и намагничивающий ток (до 1,5 раза).

Основная масса т. м. м., для которых используют наборные сердечники, выполняется на сердечниках из штампованных пластин. Трудоемкость изготовления такого сердечника составляет 20—25% от полной трудоемкости трансформатора. В Советском Союзе проведена большая работа по автоматизации процесса штамповки и сборки пластин в пакеты. Так, разработанная под руководством Н. В. Сычева и И. Б. Вольфсона автоматическая линия обеспечивает изготовление в смену 5000 трансформаторов, давая снижение трудоемкости в 2,7 раза.

§ 9. ЛЕНТОЧНЫЕ СЕРДЕЧНИКИ ИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Лента, используемая в производстве сердечников, проходит предварительную подготовку. Подготовка включает в себя операции разрезки ленты на полосы необходимой ширины, снятия заусенцев и грата с кромок и обезжиривания и очистки поверхности ленты. Разрезка ленты по ширине производится только в тех случаях, когда ширина поставленной ленты не соответствует требуемой ширине. При серийном изготовлении сердечников обычно используется широкая номенклатура лент, поставляемая металлургической промышленностью, и необходимость в разрезке ленты отпадает.

Обезжиривание и очистка поверхности ленты необходимы для того, чтобы обеспечить в дальнейшем равномерное нанесение на ленту слоя изоляции, избежать науглероживания

стали в процессе отжига и предохранить от загрязнения механизм разрезки ленты по ширине. Стальная лента поступает обычно весьма сильно загрязненной — тальком, окалиной, слоем затвердевшей минеральной смазки. Если лента относительно чиста, ее очистку можно производить после разрезки. В ряде случаев качественные сердечники можно получить и из необезжиренной ленты.

Наиболее распространен следующий способ обработки ленты. Перед очисткой лента вымачивается в течение 10—12 час. в авиационном бензине. После стекания бензина и подсушки рулон ленты устанавливают на приспособление, где лента разматывается и пропускается со скоростью до 12 *м/мин* через ванну с бензином, по выходе из которой протирается от остатков загрязнений фетровыми прокладками. При наличии ржавчины ленту пропускают через 15%-ный раствор соляной кислоты. После протирки происходит высушивание ленты либо нагретым воздухом, либо, после смотки ее в рулоны, в сушильном шкафу. Иногда бензин заменяют венской известью. До просушки ленту в этом случае промывают горячей водой.

Своеобразным является способ термовакуумного обезжиривания ленты, разработанный под руководством А. А. Кондрацкого. Рулоны ленты загружают в вакуумный сушильный шкаф, в котором нагревают до 350—400° и выдерживают в вакууме (25×10^{-3} *мм* рт. ст.) в течение часа. При этом неорганические масла испаряются с поверхности ленты. Пары отсасываются форвакуумным насосом и конденсируются в отстойнике. Достоинствами этого способа являются простота и исключение огнеопасных токсичных веществ.

Начинают применять также наиболее совершенный метод обезжиривания и очистки ленты при помощи ультразвука. Ленту предварительно протирают резиновыми протирами. Обезжиривание производится при температуре 70° в воде, в которой при помощи ультразвукового генератора и никелевых вибраторов возбуждаются колебания с частотой 15—20 *кгц*. Лента со скоростью 5—15 *м/мин* протягивается на расстоянии до 1 *мм* от поверхности вибраторов, электрическая мощность которых составляет несколько киловатт. Ультразвуковое обезжиривание обеспечивает высокую производительность, исключает пожароопасность, оздоровляет условия труда.

После обезжиривания ленту сушат при температуре 150—180°.

Разрезку ленты производят на дисковых (роликовых) ножницах. Ленту предварительно наматывают на бобину ножниц, откуда при разрезке подают к режущим элементам — дискам (роликам). Скорость движения ленты составляет 6—40 *м/мин*. На пути к дискам ленту целесообразно пропустить через фетровые прокладки для предварительного снятия грязи.

Резка ленты происходит под воздействием режущих кромок одной пары дисков, вращающихся навстречу друг другу. Оси дисков расположены так, чтобы режущие кромки заходили друг за друга на глубину, несколько большую, чем толщина разрезаемой ленты. Таким образом, чем толще лента, тем больше должна быть заходность дисков.

В направлении оси диски сдвинуты точно на ширину диска. Ширина диска в свою очередь равна требуемой ширине ленты. Диски изготовляются из инструментальной стали высокой твердости. Их боковые поверхности обрабатываются по 10-му классу точности. Для резки лент различной ширины нужно иметь набор ножей (дисков), которые являются сменным элементом конструкции. Ножницы могут снабжаться несколькими парами режущих дисков, т. е. выполняться многоручьевыми. Такие ножницы более производительны, обеспечивают более высокое качество резки, чем одноручьевые, но более сложны в изготовлении. В настоящее время применяют ножницы с числом ручьев от 5 до 15. В отечественной промышленности применяют ножницы марок ПРН-1, ДН-2 (для толстых лент) и др.

По мере износа диски должны заново шлифоваться. Для сохранения плотного соприкосновения между дисками рабочей пары после шлифовки необходимо, чтобы была возможность их перемещения вдоль оси.

Соприкосновение ножей должно происходить под нажимом тем большим, чем больше толщина разрезаемой ленты. Точность установки ножей, как и точность их изготовления, определяет величину заусенцев на ленте после резки. Современные конструкции ножниц обеспечивают получение заусенцев небольшой величины. Так, для лент толщиной 0,05 *мм* удается получить заусенцы величиной не более 2—4 *мк*, для лент 0,08—0,2 *мм* — не более 4—8 *мк*. Точность соблюдения ширины ленты достаточно высока. Так, при толщине ленты 0,35 *мм* разброс по ширине в производственных условиях не превосходит 0,3 *мм*. Прецизионная резка тонких лент обеспечивает точность резания ±0,05 *мм*. Созданы конструкции ножниц, позволяющие резать ленту толщиной от 0,02 до 0,35 *мм* и шириной от 80 до 150 *мм*. Однако при переходе от более толстых к тонким лентам следует менять диски, иначе величина заусенцев будет увеличиваться.

Лента после разрезки дисками подается лентопротяжным механизмом на приемные кассеты, щеки которых должны быть из мягких материалов во избежание сминания кромок ленты. Вращение кассет и режущих дисков осуществляется одним приводом через различные кинематические передачи. При этом приемные кассеты имеют фрикционное зацепление, обеспечивающее выравнивание скорости резания и движения ленты

в кассете путем автоматического изменения степени проскальзывания.

Указанным способом удается резать ленту толщиной вплоть до 0,01 *мм*. Однако более высокое качество тонких лент (0,02 *мм* и тоньше) может быть обеспечено, если при разрезке такие ленты сложить по толщине в многослойный пакет (до 5—8 слоев). Слои проклеивают и подпрессовывают на специальных валках. После резки разделение слоев производится расклинивающим устройством.

Снятие заусенцев и притупливание острых кромок ленты необходимы для обеспечения плотного прилегания слоев ленты и уменьшения вероятности замыканий соседних лент, ухудшающих электромагнитные свойства сердечников. Указанные операции можно производить механическим путем, обычно с помощью абразивных камней. При этом лента со скоростью 10—15 *м/мин* пропускается последовательно через 2—4 камня с уменьшающейся зернистостью. Камни имеют дугообразные лунки, стенок которых касаются края ленты, протягиваемой с определенным натягом. Один камень удаляет заусенцы и притупляет кромку ленты с одной стороны ленты (например нижней), другой камень — с другой стороны (например верхней). Вместо абразивных камней могут применяться и металлические ножи, также имеющие дугообразную режущую кромку. После обработки таким способом ленты толщиной 0,35 *мм* остающиеся заусенцы не превышают по величине 2—3 *мк*, что вполне допустимо. Иногда ленту протягивают между двумя абразивными кругами, вращающимися в противоположных направлениях. Недостаток всех этих способов — износ (притупление) инструмента. В этом отношении более стойки металлические резцы.

Рассмотренные способы снятия заусенцев обеспечивают удовлетворительное качество для не очень тонких лент (0,05—0,08 *мм* и больше). Для обработки более тонких лент целесообразно, кроме того, применение подкатки на 1—2 *мк* между стальными валками высокой твердости.

Более современным способом снятия заусенцев является разработанный в последние годы способ электрополировки. Практическое применение этот способ нашел в производстве сердечников из железоникелевых сплавов (см. § 10).

Нанесение склеивающе-изоляционного слоя на ленту (5—10 *мк*) часто входит в ее подготовку. Этот слой оплавляется затем в процессе отжига сердечников. Это обеспечивает монолитность изготовленного сердечника и уменьшение шума при работе трансформатора. Слой наносится при протягивании ленты через ванну со скоростью 5—14 *м/мин*, при этом на ленте осаждается тот или иной состав из его водной суспензии. После этого лента сушится при 200—500°.

Перспективен метод напыливания изоляционного порошка в электростатическом поле, что осуществляется в зоне коронного разряда при напряженности поля 3—4 *кв/см.*

Выбор изоляционного состава зависит от характера дальнейшего технологического процесса и режима отжига.

После завершения подготовки ленты приступают к изготовлению сердечников. Поскольку дальнейшая технология изготовления различных видов сердечников различна, ее следует рассмотреть дифференцированно. При этом надо помнить, что сердечники броневых и трехфазных трансформаторов комплектуются по существу из стержневых П-образных сердечников.

Замкнутые сердечники. Замкнутые сердечники изготовляют методом навивки ленты на металлических оправках. Тороидальные сердечники навивают на круглых оправках требуемого диаметра. Прямоугольные сердечники (для БТ, СТ и ЗТ) навивают на прямоугольных оправках, форма которых повторяет форму окна сердечника.

Изоляция ленты, если она не нанесена заранее, может осуществляться непосредственно при навивке путем протягивания ленты через камеру с молотым тальком или со взвешенным распыленным маршалитом. Тальк или маршалит при этом осаждаются на поверхности ленты слоем в несколько микронов.

Хорошее качество изоляции обеспечивает оксидирование ленты, т. е. создание на ее поверхности тонкого слоя окисла. Оксидирование производится до навивки в свободно свернутых рулонах, нагреваемых до 650° с доступом воздуха. Достоинством этого способа является простота и обеспечение высокого качества сердечников при разных частотах, вплоть до ультразвуковых. Проводятся работы по изолированию ленты с помощью керамических составов.

Навивка сердечников может производиться на обычных токарных или специальных станках (рис. 53). Для получения плотной навивки необходимо обеспечить достаточный натяг ленты — около 5—10 *кг/мм*^{2} для тонких лент и до 10—25 *кг/мм*^{2} для ленты 0,35 *мм*. При навивке прямоугольных сердечников желательно применять также обкатку сердечника прижимным роликом примерно с тем же усилием. Скорость навивки зависит от мощности станка и размеров сердечника и может составлять от 10—50 до 150 об/мин (для тороидальных сердечников и выше). Разработаны станки, не требующие натяжения ленты при намотке.

Отжиг. Навитые сердечники для снятия механических напряжений проходят операцию отжига. Во избежание деформации сердечник отжигают на тех же оправках, на которых они навивались. Снаружи они плотно охватываются формующими скобами (рис. 54). Скобы и оправки должны быть жаропрочны.

Для холоднокатаных сталей наилучшие результаты обеспечивает вакуумный отжиг или отжиг в водороде. Вакуум составляет

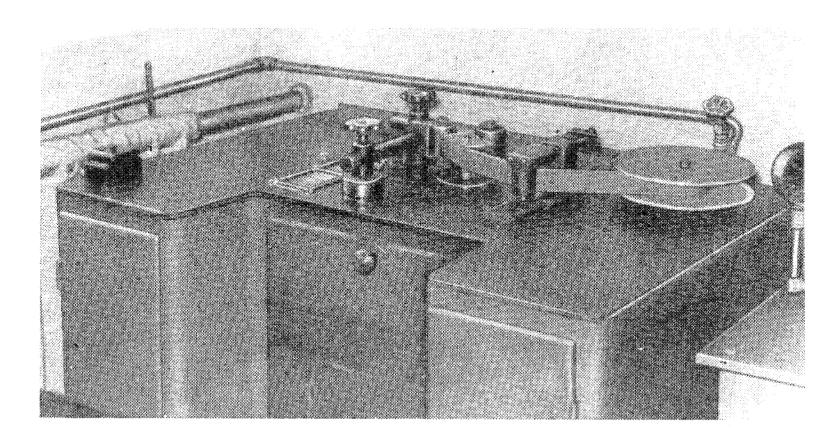


Рис. 53. Станок для навивки ленточных сердечников из холоднокатаной стали

10^{-3} *мм* рт. ст. Нагрев контейнера с сердечниками ведется до температуры 850—950°, которая выдерживается 3—4 час. Охлаждение идет с печью со скоростью 50° в час. При температуре 650° вакуум снимается и контейнер сообщается с атмосферой для окисления (изолирования) кромок ленты. Если сердечники навивались из стали, не прошедшей первый отжиг на заводе-изготовителе, нагрев ведется до температур 1100—1150°.

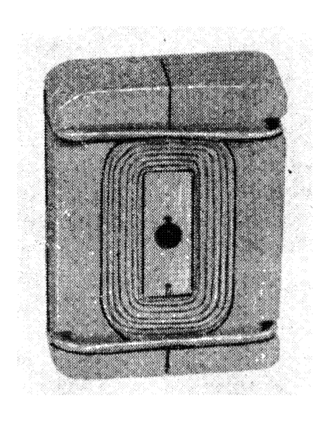


Рис. 54 Навитый ленточный сердечник на оправке и в формовочных скобах перед отжигом.

При таких температурах возможно сваривание соседних слоев ленты, например при оксидной изоляции. Поэтому при использовании этого способа изоляции первый, высокотемпературный, отжиг лучше вести до навивки ленты.

Изготовленный подобным образом сердечник имеет магнитные свойства, воспроизводящие исходные свойства материала.

На практике, ввиду простоты осуществления, часто применяют безвакуумный отжиг сердечников, изготовленных из изолированной ленты, в том числе и весьма кратковременный (до

1 час.) отжиг без укупорки сердечников. Полного восстановления свойств стали такие режимы не обеспечивают (особенно для тонких лент).

Для иллюстрации на рис. 55 приведены кривые удельных потерь в сердечнике при вакуумном и кратковременном безвакуумном отжиге. Сердечники с изоляцией ленты оксидной пленкой из-за возможности сваривания ленты сколько-нибудь длительному безвакуумному отжигу подвергать нельзя. Температура и длительность упрощенных режимов отжига свя-

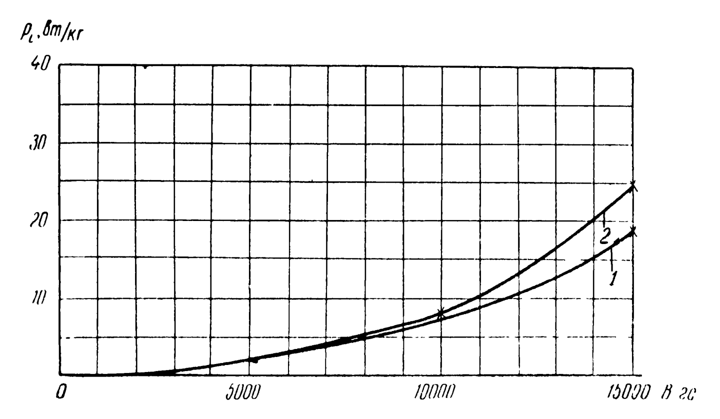


Рис. 55. Влияние способа отжига на потери ленточных сердечников из холоднокатаной стали.
1 — отжиг в вакууме; *2* — отжиг без вакуума.

заны с размерами сердечников и видом изоляционного состава Так, маршалит и тальк допускают любой режим отжига.

Из склеивающе-изоляционных находят применение составы на основе стеклоэмалей и жидкого стекла. Сердечники на стеклоизоляции обладают высокой теплостойкостью (200—300°). К составам на основе стеклоэмалей относятся водные суспензии эмали № 29 Дулевского завода, флюса № 1019 (38%) с черной свинцовой краской (10%) и глиной (3%), к составам на основе жидкого стекла — водный раствор жидкого стекла (80%) с каолином (20%), водная суспензия жидкого стекла (67%) с кремниевой кислотой (20%), жидкого стекла с двуокисью титана, жидкого стекла СЦ (70%) с окисью алюминия (30%). Стеклоэмали при температурах свыше 850—900° трескаются и слезают с ленты; лучшие результаты получаются при использовании спиртовых суспензий, но они дороже и пожароопасны; составы на основе жидкого стекла допускают кратковременно температуры до 950° и выше. Последние, однако, гигроскопичны и влагозащита сердечников при их применении должна обеспечиваться покровными лаками. Сердечники с изоляцией ленты стеклоэмалями, прошедшие длительный отжиг, для приобретения необходимой механи-

ческой прочности должны дополнительно пропитываться склеивающим составом. Такая пропитка тем более целесообразна, если лента перед намоткой сердечника не покрывалась оплавляемым изоляционным слоем. Пропитка производится после отжига. На монолитный пропитанный сердечник можно непосредственно, без защитных каркасов, накладывать обмотки, не опасаясь ухудшения его магнитных свойств. Однако такое ухудшение свойств может вызвать сама пропитка из-за возможных при этом механических напряжений. Например, пропитка эпоксидными компаундами приводит к росту потерь в сердечнике до 30% и намагничивающих токов — в 2,5—3 раза (максимально). Пропиточный состав поэтому должен быть достаточно эластичным. Лучшие показатели обеспечивают клей БФ-4 и лак 1154, практически не влияющие на свойства сердечников. Сердечники с такой пропиткой не должны при эксплуатации иметь температуру выше 130—150°.

Иногда у тороидальных сердечников после пропитки острые кромки снимают на токарном станке.

Разъемные сердечники. Разъемные ленточные сердечники изготовляют тремя принципиально различными способами: навивкой и резкой сердечника; штамповкой и гибкой ленты; поэлементной сборкой сердечника в катушке. Рассмотрим их последовательно.

Способ навивки и резки. Для получения этим способом разъемного сердечника навитый замкнутый сердечник разрезают на две половинки. Подобные сердечники получили название разрезных. Навивка и отжиг сердечников, предназначенных для резки, осуществляются точно так же, как и замкнутых сердечников. Режим отжига в этом случае сказывается на различии свойств сердечников в несколько меньшей степени. К склейке (пропитке) здесь предъявляются более высокие требования, поскольку необходимо обеспечить высокую монолитность сердечника, исключающую какие-либо деформации половинок сердечника, образующихся после резки.

Необходимое качество пропитки, если монолитность обеспечивается этим способом, может быть получено двукратной пропиткой хорошо высушенных сердечников клеем БФ-4. Первая пропитка осуществляется попеременно под вакуумом и под давлением в тренировочном режиме. Вязкость клея 80—100 сек. по ВЗ-4. Вакуум 60—80 *мм* рт. ст., давление 3—4 *атм*. Каждый цикл длится около 5 мин., количество циклов 3. Вторая пропитка ведется после сушки окунанием в клей вязкостью 180—200 сек. в течение 15—20 мин. Заключительная сушка сердечников ведется при последовательно возрастающих ступенями температурах от 20° до 140° с выдержкой на этих ступенях от 0,5 до 2 час. Удовлетворительные результаты дает также пропитка модифицированным компаундом МБК-3.

Сердечники с одним резом могут пропитываться и лаком 1154, обеспечивающим несколько меньшую механическую прочность. Наилучшую монолитность сердечников без ухудшения их электромагнитных свойств обеспечивает пропитка компаундом КП-10. Однако, по исследованиям Е. И. Фридман, после длительного теплового старения таких сердечников (при температуре 150°) наблюдается заметный рост магнитных потерь (до 40%) и намагничивающих токов (до 80%). Пропитка компаундом КП-10 ведется под вакуумом 20—40 *мм* рт. ст. (15—20 мин.) с последующей выдержкой при атмосферном давлении (15 мин.). Сушка ведется при 125—150° и продолжается всего 4 часа.

В заводских условиях производительнее изготовлять сердечники с использованием изоляционного слоя на ленте. Здесь, однако, встречаются свои трудности: стеклоэмали не обеспечивают достаточной монолитности, а составы на жидком стекле способствуют быстрому износу режущего инструмента при разрезке.

Пропитанные или склеенные сердечники подвергают разрезке. Операция резки очень ответственна, ибо оказывает наиболее глубокое влияние на качество сердечника — вводит неизбежный зазор в магнитную цепь и приводит к росту потерь на вихревые токи благодаря замыканиям соседних листов ленты в месте реза. Резка может быть произведена различными средствами: фрезой, анодно-механическим или электроискровым способами. Однако наилучшие результаты дает резка абразивными кругами — корундовым и, особенно, алмазным. На рис. 56 приведены кривые удельных потерь и намагничивающих сил $H'_{\sim}$ сердечников до и после резки различными способами.

После резки кругами дополнительная обработка торцов сердечника (шлифовка) обычно не требуется. Зазор в месте стыка половинок обеспечивается при этом до 10—15 *мк* на сторону, что вполне приемлемо (при резке алмазным кругом — меньше). Для резки применяют круги средней твердости на вулканитовой связке с зернистостью 80, толщиной 1—1,5 *мм*, диаметром 125—200 *мм*. Скорость вращения круга 3000—5000 об/мин, подача 0,1 *мм* на один рабочий ход.

Резку можно вести на заточном или специально приспособленных универсальных металлообрабатывающих станках. Разработаны также специальные станки для резки сердечников, обеспечивающие изменение режимов резания в широких пределах. Такой станок изображен на рис. 57.

При резке сердечник закладывается в приспособление, между губками которого и сердечником устанавливаются стальные пластинки толщиной 1—2 *мм*, разрезаемые вместе с сердечником.

Недостаток обычных кругов — быстрый износ. Бо́льшую стойкость (до 100 резов между переточками) могут обеспечить твердосплавные дисковые прорезные фрезы.

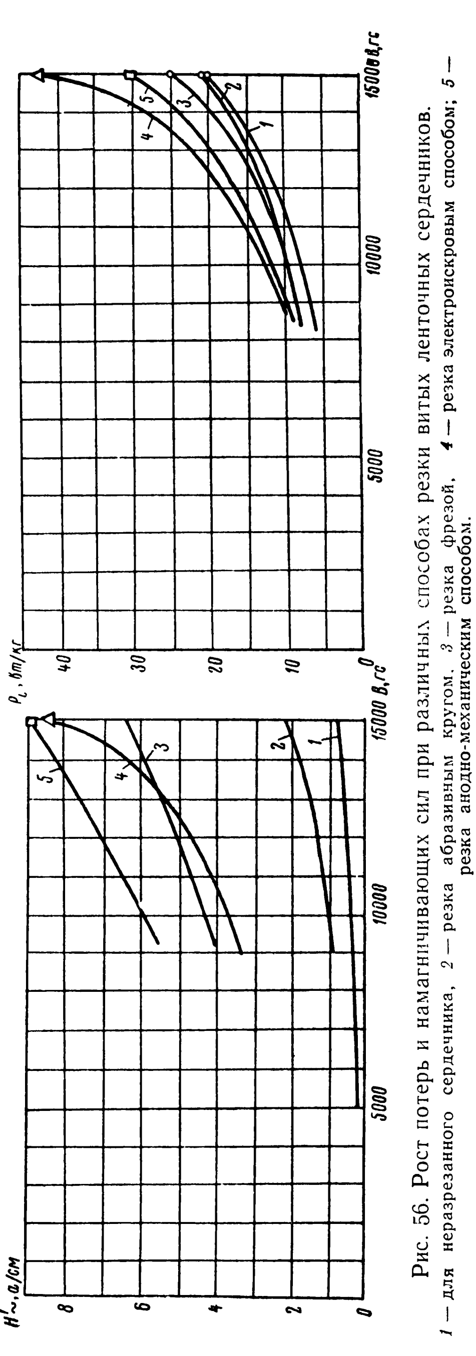


Рис. 56. Рост потерь и намагничивающих сил при различных способах резки витых ленточных сердечников.

1 — для неразрезанного сердечника, 2 — резка абразивным кругом, 3 — резка фрезой, 4 — резка электроискровым способом; 5 — резка анодно-механическим способом.

Резка фрезой может производиться на фрезерном станке. Толщина фрезы 1—2 *мм,* скорость вращения 75—200 об/мин. После резки фрезой для уменьшения зазора необходимо дополнительно прошлифовать торцы сердечника торцовой фрезой или абразивным кругом. Для уменьшения замыканий лент по торцу режущий инструмент лучше подавать не сверху, а сбоку (в плоскости торца).

Готовые половинки сердечников комплектуются попарно и поступают на контроль качества, после чего их торцы покрываются противокоррозионной смазкой.

Таким образом, принята следующая технологическая схема изготовления разрезных сердечников:

Нарезка ленты по ширине;
зачистка заусенцев;
обезжиривание ленты;
изоляция ленты;
навивка сердечников *с нанесением изоляции*;
отжиг;
пропитка сердечников;
резка;
шлифовка торцов или притирка;
контроль качества.

Примечание. Операции, выделенные курсивом, могут отсутствовать.

С целью уменьшения потерь исследуются возможности осуществления резки до отжига сердечников, кратковременного распушения их торцов после резки (для ликвидации замыканий), а также проведения после резки режима отпуска (380—400°).

Достоинством метода навивки и резки является относительная простота его осуществления. В частности, он может быть налажен в опытном и мелкосерийном производстве. В заводских условиях достигнута высокая производительность изготовления сердечников этим методом —до нескольких минут на сердечник. Этим методом в СССР изготовляют сердечники весом до 15 *кг*. Его усовершенствование и отработка проведены при участии многих специалистов: П. С. Ященко, В. В. Могилевского, М. В. Лукьянова, В. П. Лопатина и др.

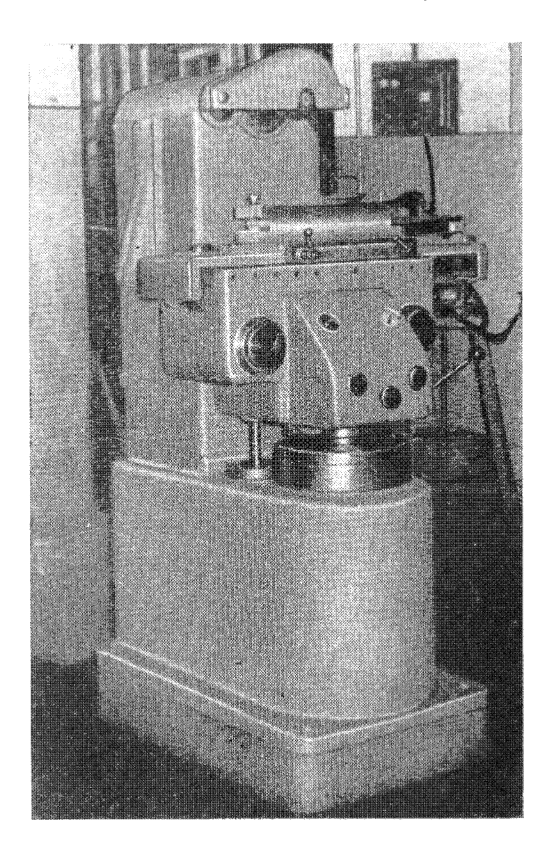


Рис. 57. Станок для резки витых ленточных сердечников.

Недостатки способа — отсутствие взаимозаменяемости полусердечников (без специальной усложненной обработки торцов) и трудность автоматизации.

Способ штамповки и гибки ленты разработан в СССР под руководством Г. С. Гуськова. Этим способом изготовляется сразу полусердечник, часто называемый С-образным или U-образным сердечником. Способ состоит в следующем. Лента, покрытая склеивающе-изоляционным составом, на специальном штампе рубится на отрезки разной длины с определенным шагом отсечки. Комплект таких пластин на полусердечник собирается в трапециевидный пакет (рис. 58) и поступает на пресс. С помощью матрицы и пуансона, размеры которых соответствуют размерам окна и наружного обвода сердечника, производится гибка пакета, в результате которой сердечник приобретает нужную форму (рис. 58). Гибка происходит при высокой температуре (800—850°), достаточной для оплавления изоляционной эмали, которая цементирует сердечник в единое целое.

Отжиг сердечников может производиться сразу вслед за гибкой или одновременно с ней. После отжига на фрезерном станке в специальном приспособлении производят обработку торцов, которые затем подвергаются шлифовке механическим или анодно-механическим способом. Обработка торцов совершенно необходима ввиду наличия сильной «гребенки» (рис. 58). Готовые полусердечники полностью взаимозаменяемы.

Лучшее качество сердечников обеспечивается в том случае, когда грубая обработка торцов ведется до отжига. В этом случае фрезеровка торцов и отжиг сердечника ведутся в специаль-

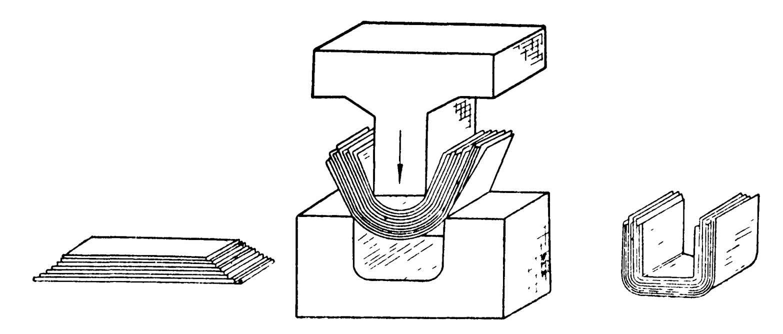


Рис. 58. Изготовление разъемных ленточных сердечников методом штамповки и гибки ленты.

ной кассете, в которую сердечник подается сразу после операции гибки и которая жестко фиксирует его конфигурацию. Гибка сердечника осуществляется при нормальной температуре, а склейка происходит во время отжига.

Методом штамповки и гибки в отечественной технике уже изготовляют сердечники весом до 1—3 *кг*.

Описанная технология открывает широкие возможности автоматизации всего процесса изготовления сердечников, поэтому она особенно прогрессивна для массового производства. На первых отечественных полуавтоматических установках затрата времени на один сердечник составляла 15—45 мин. В настоящее время в результате работ, проведенных под руководством И. И. Иванова, Н. В. Сычева, И. Б. Вольфсона и др., спроектированы законченные автоматические линии. Одна из таких линий обеспечивает выпуск полусердечника (включая операции контроля) за 0,1—1 мин., т. е. производительность ее до 4000 сердечников в смену. Линия обслуживается семью рабочими.

Следует, однако, отметить, что указанные темпы изготовления сердечников возможны только при очень кратковременном отжиге (минуты), производимом в рамках потока в печах, не обеспечивающих создание вакуума. Поэтому при использовании холоднокатаной стали свойства ее не реализуются и качество

сердечников не является наилучшим, а при длительном их использовании (несколько лет) с течением времени может наблюдаться дополнительное снижение магнитных свойств.

Во избежание этого можно производить полный, длительный отжиг (см. выше), хотя при этом несколько усложняется производство и снижается темп выпуска сердечников.

Дальнейшее усовершенствование описываемой технологии для лент 0,15—0,2 *мм* и толще произведено под руководством

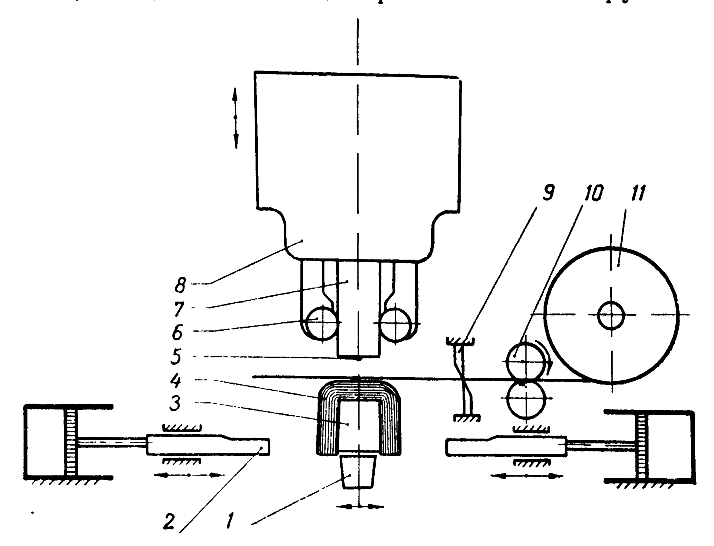


Рис. 59. Схема автомата для поэлементной штамповки и гибки ленты с поэлементной подрезкой торцов полусердечника.

1 — подрезной нож; *2* — прижимной шток; *3* — оправка; *4* — изготавливаемый полусердечник; *5* — фиксатор; *6* — обжимной ролик; *7* — направляющий шток; *8* — толкатель; *9* — отрубной нож; *10* — подающий механизм; *11* — кассета с лентой.

Ф. В. Урьяша и Л. Г. Шейхода. Это усовершенствование позволяет исключить или свести до минимума необходимость обработки торцов после гибки пакета, для чего в одном автомате совмещены функции рубки ленты и гибки пакета (рис. 59). После отрезки ленты ножом *9*, обжатия вокруг оправки *3* обжимными роликами *6* толкателя *8* и прижима штоком *2* подвижной нож *1*, перемещаясь влево и вправо, подрезает ленту по строго фиксированной плоскости реза на обоих стержнях полусердечника.

Лента при изготовлении сердечника таким способом испытывает меньшее воздействие механических напряжений. Появляется возможность осуществления фигурных торцов сложной формы для улучшения свойств собранного магнитопровода. После формовки пакета он проходит калибровку размеров и

отжиг. В камеру отжига полусердечник поступает свободным от каких-либо оправок, скоб и т. д. Для изготовленных этим способом сердечников авторы рекомендуют ускоренный безвакуумный отжиг в обычной атмосфере с нагревом до 950°, выдержкой в течение 15 мин. при 800° и быстрым охлаждением на воздухе. В качестве склеивающе-изоляционного состава ленты используется водная суспензия жидкого стекла с кремниевой кислотой.

В целях перекрытия зазора разработана также технология, позволяющая получить полусердечники, «замком» входящие

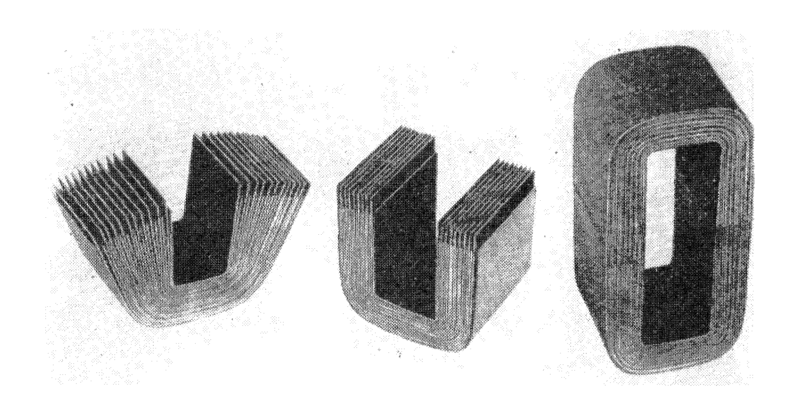


Рис. 60. Разъемный ленточный сердечник с «замком» по торцам половинок в процессе изготовления.

один в другой. Такой сердечник в различных стадиях изготовления показан на рис. 60. Он, однако, из-за удвоения индукции в местах перекрытия не имеет преимуществ по сравнению с сердечником, плоскости которого хорошо обработаны. Лишь при дополнительном введении в «замок» ферромагнитного порошка качество сердечника повышается. Достоинством такого сердечника является легкость его сборки и крепления в трансформаторе.

Инженерная мысль работает сейчас над изысканием возможностей получения в результате одной операции полного комплекта заготовок пластин на один пакет, а также рационального сочетания способов гибки и резки (резка на полусердечники формованного многослойного профиля — профилированного пакета полос).

Заметим, что способ штамповки и гибки ленты не применим для сердечников с одним резом.

Способ поэлементной сборки. Сердечник наматывается на оправку и отжигается. Затем от сердечника последовательно отрезаются по два витка, которые снимаются с оправки. Концы такого «двухвиткового элемента» разводятся

в стороны (рис. 61), после чего они поочередно вставляются в катушку броневого трансформатора в той же последовательности, в какой располагались на оправке после навивки.

Эта технология уступает рассмотренным ранее и является по существу разновидностью шихтовки. Она может применяться для сборки сердечников больших размеров, если таковые не производятся другими способами. Подобные сердечники имеет смысл делать только из текстурованной стали.

То же самое можно сказать о таком способе сборки, как последовательное сочленение замком при вматывании в катушку отдельных коротких лент, имеющих на одном конце паз, а на другом соответствующий выступ.

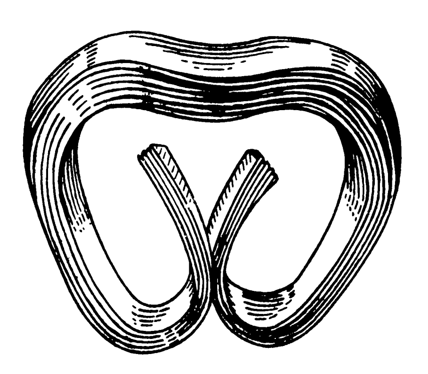


Рис. 61. Пакет двухвитковых элементов для поэлементной шихтовки разъемного ленточного сердечника.

§ 10. ЛЕНТОЧНЫЕ СЕРДЕЧНИКИ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Сердечники из железоникелевых сплавов долгое время изготовлялись только в виде замкнутых, как правило, тороидальных сердечников. Однако в последние годы в СССР успешно освоено изготовление и разъемных сердечников. В отличие от предыдущего случая разъемные сердечники из железоникелевых сплавов всегда изготовляют способом навивки и резки. В технологии изготовления этих сердечников много общего с рассмотренной выше, однако имеется и специфика.

Подготовка ленты. Лента из железоникелевых сплавов поступает от изготовителя относительно чистой. Она покрыта обычно лишь тонким слоем легко удаляемой смазки. Поэтому очистка ленты производится обычно после разрезки ленты по ширине и снятия заусенцев. Разрезка ленты рассмотрена выше и дополнительных особенностей не имеет (см. § 9).

Снятие заусенцев. Снятие заусенцев может производиться описанными выше способами. При этом подкатка применяется чаще и может сочетаться с предварительным прошкуриванием ленты наждачной бумагой. Более прогрессивным является новый способ — способ электрополировки. Достоинства его более всего проявляются при обработке тонких лент (минимум 0,01 *мм*).

Сущность процесса электрополировки состоит в анодном растворении металлических заусенцев при электролизе. В первых установках электрополировка производилась при протяжке ленты через электролитическую ванну. Однако значительно большую производительность и простоту обеспечивает принятый

сейчас метод электрополировки лент в рулонах, разработанный Н. И. Матвеевым. Осуществляется он следующим образом. Рулон ленты нужной ширины (после резки) помещается в загрузочное приспособление — освинцованную медную трубку, охватывающую вставленный рулон с обеспечением между трубкой и рулоном хорошего контакта. Концы трубки подключаются к положительному полюсу источника постоянного тока. Таким образом, полируемый рулон становится анодом.

Через внутреннюю полость трубки при электролизе циркулирует охлаждающая вода. Трубка с рулоном в вертикальном положении опускается в электролитическую ванну. Электролит — смесь фосфорной (82%) и серной (18%) кислот высокой концентрации. Минус источника подводится к двум освинцованным железным катодам, опущенным в ванну с боковых сторон рулона ленты. Процесс электролиза сопровождается растворением в электролите заусенцев полируемого рулона. Для ускорения процесса он ведется при высокой плотности тока (2500 $а/см^2$ на аноде). При этом выделяется большое количество тепла, вследствие чего и рулон и ванну следует принудительно охлаждать. Ванна для этой цели имеет водяную рубашку.

Для качественного прохождения процесса температура рулона должна быть ниже температуры электролита, поэтому охлаждение рулона через трубку должно вестись особенно интенсивно. Температура электролита должна составлять 20—30° с допустимыми колебаниями в процессе полировки в несколько градусов. Растворение заусенцев идет одновременно с двух сторон рулона. Для равномерного растворения заусенцев по всей боковой поверхности необходимо обеспечить во всех витках рулона одинаковую плотность тока. С этой целью приходится искусственно увеличивать расстояние от катода до рулона у наружных его витков и уменьшать у внутренних. Это выравнивает электрическое сопротивление трубок тока, поскольку наружным трубкам соответствует малое сопротивление ленты, но увеличенное сопротивление электролита и наоборот.

Таким образом, катод должен иметь форму конуса с вершиной в центре рулона. Расстояние между катодом и рулоном и степень конусности зависят от материала ленты и плотности намотки рулона и подбираются экспериментально просмотром в микроскоп торцов полированной ленты.

Для предохранения межвитковых поверхностей ленты от химического действия кислот электролита рулон перед электрополировкой на 5—6 мин. погружается в малорастворимый в воде органический растворитель, например дихлорэтан, и подсушивается. После этого для создания при электролизе вязкой пленки у анода, препятствующей растворению основного тела ленты, рулон на 1—2 мин. опускается в глицерин. По окончании электрополировки, продолжающейся несколько минут, рулон для

нейтрализации остатков электролита погружается в 5%-ный раствор двууглекислой соды. Затем рулон освобождается из загрузочного приспособления и перематывается с протиркой ленты фетровыми прокладками, смачиваемыми водой и ацетоном.

Электрополировкой можно снимать заусенцы даже значительной величины (больше 10 *мк*). Однако для исключения излишнего растворения ленты желательно ограничивать величину заусенцев и тем сильнее, чем тоньше лента. Так, для ленты 0,08 *мм* желательно иметь заусенцы не более 8—10 *мк*.

Процесс электрополировки отличается высокой производительностью. Заусенцы в 10 *мк* удаляются в течение 5—10 мин. В зависимости от толщины ленты скорость электрополировки составляет от 600 до 3000 *м/час* при объеме ванны 3 *л*, токе 25 *а* и диаметре рулона 100 *мм*.

Обезжиривание и очистка. Ввиду большой чистоты железоникелевых лент обезжиривание и очистка их осуществляются легче, чем стальных лент. Предварительного вымачивания здесь не требуется. Лента обезжиривается путем медленного протягивания через ванну с обезжиривающим раствором. Часто лента последовательно пропускается через черновую и чистовую ванны. На входе и выходе из ванн лента протирается фетровыми прокладками. После выхода из ванны лента просушивается. Иногда в ванну устанавливают ролики, вращающиеся встречно движению ленты и несущие волосяные щетки, дополнительно очищающие ленту. Ролики могут также выполнять роль направляющих элементов.

Обезжиривающими составами могут быть бензин, ацетон, четыреххлористый углерод. Последний не пожароопасен и в этом заключается его существенное преимущество.

Однако его пары очень ядовиты, что требует принятия сугубых мер предосторожности (интенсивная приточно-вытяжная вентиляция и др.).

Очень часто операция очистки ленты совмещается с операцией снятия заусенцев и обе операции осуществляются последовательно на одной установке.

В настоящее время предложен простой способ обезжиривания железоникелевых лент путем выжигания жиров при пропускании тока через ленту. Эта операция проводится одновременно с навивкой сердечников.

Способы изоляции ленты. Изоляция ленты из железоникелевых сплавов должна отвечать дополнительному требованию по сравнению с изоляцией стальной ленты — она должна быть жаропрочной, поскольку отжиг сердечников в этом случае идет при высоких температурах, превышающих 1000°. Взаимодействие материалов изоляционного слоя с магнитным материалом здесь особенно нежелательно, ибо при этом свойства материала

ухудшаются существенно. Поэтому поискам наилучших изоляционных составов было уделено много внимания как в СССР, так и за рубежом. Вопросы о способах изоляции тесно связаны с вопросом о навивке сердечников, поскольку нанесение изоляции производится непосредственно в процессе навивки. Известны следующие способы изоляции: припудривание ленты тальком, электрофорезная изоляция, механическое нанесение на ленту различных суспензий. Такими суспензиями могут быть: взвесь молотого песка в смеси кремний-органического эластомера и бензина (ЭОК), взвесь окиси хрома в органическом растворителе, смесь с кремний-органическим лаком ФГ-9 и толуолом окиси магния (состав симатол) или двуокиси титана (состав тиситол).

Процесс электрофореза состоит в анодном (анафорез) или катодном (катафорез) переносе под воздействием электрического поля на поверхность ленты изолирующего вещества, находящегося в суспензном состоянии в смеси органического растворителя и стабилизирующего состава. Известны суспензии кремниевой кислоты (двуокиси кремния) в ацетоне, окиси магния в четыреххлористом углероде, окиси алюминия в метиловом спирте. Стабилизаторами являются раствор коллоксилина, олеиновая кислота и др.

Наилучшее качество сердечников обеспечивают электрофорезные способы, каждый из разновидностей которого имеет свои достоинства и недостатки.

Составы симатол и тиситол обеспечивают максимальную жаропрочность изоляции (до 1300°), механическую прочность пленки и позволяют упростить процесс изоляции, которая осуществляется простым протягиванием ленты со скоростью 3—10 *м/мин* через изоляционную суспензию. Недостатком этих способов является трудность обеспечения равномерности покрытия и его относительно большая толщина, что затрудняет применение составов, особенно при малых толщинах ленты (0,05 *мм* и менее). Кроме того, возможно получение рыхлых сердечников. Прочие перечисленные способы не имеют каких-либо преимуществ перед рассмотренными и применяются крайне редко.

Элекрофорезным способам присуща известная сложность. Кроме того, при применении кремниевой или алюминиевой суспензий при высокотемпературном отжиге возможно внедрение кремния (алюминия) в материал ленты, что заметно снижает ее свойства, особенно если она тонкая. Это послужило поводом для внедрения магнезиальной суспензии, лишенной указанного недостатка. Эта суспензия обеспечивает также наименьший процент витковых замыканий в сердечнике. Однако она содержит летучие органические вещества, которые выгорают при отжиге и засоряют вакуум-насосы печей. Кремниевая суспензия не имеет этого производственного недостатка.

Что касается растворителей, то ацетон является пожароопасным, четыреххлористый углерод — огнебезопасным, но крайне токсичным.

Таким образом, как кремниевая суспензия, так и магнезиальная имеют свои преимущества и недостатки и свои сферы применения. Применение суспензии на окиси алюминия нецелесообразно, поскольку ее компоненты взрывоопасны и ядовиты, а преимуществ в свойствах эта суспензия перед другими не имеет.

Магнезиальная суспензия является более новой. Она содержит по весу 93,5% окиси магния, 4,5% олеиновой кислоты, 2% четыреххлористого углерода. Ее особенно рационально применять при изготовлении больших сердечников, когда объем электрофорезной ванны велик и вопросы пожароопасности выступают на первый план. Покрытие ленты магнезиальной суспензией идет методом анафореза, т. е. на ленту подается отрицательный потенциал, а на ванну, являющуюся вторым полюсом, — положительный. Заметим, что процесс анафореза магнезиальной суспензии происходит при относительно высоком напряжении—300—350 *в*, что также является недостатком данного способа.

Широко распространенным до сего времени на практике остается способ катафореза с использованием кремниевой суспензии. В этом случае на ленту подается положительный потенциал 20—60 *в*. Ток через электролит доходит до 50 *ма*. На ленте в виде сухого остатка осаждается слой кремниевой кислоты толщиной в несколько микронов.

Протяжка ленты через ванну с суспензией осуществляется в процессе электрофореза со скоростью 1,2—3 *м/мин*. При этом очень удобно регулировать толщину слоя покрытия, что осуществляется изменением скорости движения ленты, концентрации суспензии и величины приложенного напряжения. Последний фактор играет первостепенную роль в процессе электрофореза.

Для получения качественного покрытия обязательно перемешивание суспензии в процессе электрофореза и сохранение небольшого содержания в ней сухого остатка (при использовании магнезиальной суспензии—3—4%). Для получения равномерного слоя изоляции желательно также сохранение постоянного объема суспензии в ванне, постоянной концентрации сухого остатка и постоянной скорости движения ленты. По выходе из ванны лента просушивается горячим воздухом.

В последнее время разработан существенно новый, эффективный способ нанесения на ленту изоляции методом механического накатывания (для лент толще 0,02 *мм*). В качестве изоляционного состава используется водная суспензия окиси алюминия или водная суспензия окиси алюминия и окиси магния,

причем отношение окислов составляет 4:1. В первом случае в качестве окиси магния берется окись 4ДА (чистая) по ТУ 2063—49. Окись с водой загружаются в отношении 1:2 в шаровую мельницу на помол, который продолжается 48 час. Суспензия может разбавляться водой до желаемой концентрации. Обычно плотность раствора составляет 1,2—1,3 *г/см*³. Суспензия заливается в ванну, в которую помещен вращающийся ролик. С поверхностью ролика, выступающей из ванны, соприкасается лента, протягиваемая со скоростью 10—20 *м/мин*. При этом лента плотно прижимается к ролику, который, вращаясь, накатывает изоляционную суспензию на ленту. Лента предварительно обезжиривается пропусканием по ней тока, а после нанесения изоляции таким же способом высушивается.

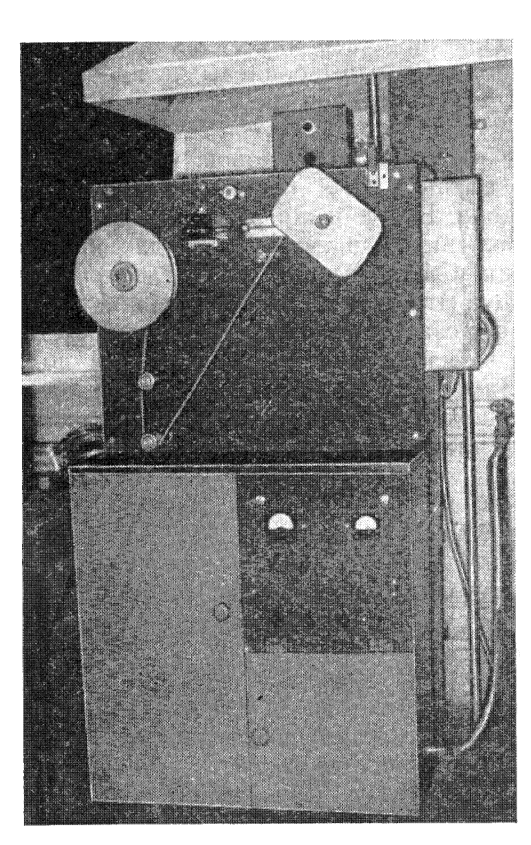


Рис. 62. Катафорезная установка для навивки и изоляции ленточных сердечников из железоникелевых сплавов.

Достоинствами описанного способа являются полная его пожаро- и взрывобезопасность, отсутствие вредных для персонала компонентов среди используемых материалов. По предварительным исследованиям данный способ обеспечивает получение сердечников с достаточно высокими механическими и электромагнитными свойствами.

Исследуется также более производительный метод опыления ленты маршалитом в пылевой камере. Изолирование этим способом лент шире 25 *мм* встречает некоторые трудности и процесс требует дополнительной отработки.

Изоляцию ленты путем оксидирования осуществить не удается, так как при последующем отжиге происходит сваривание смежных витков ленты сердечников.

Навивка сердечников. Навивка происходит обычно одновременно с нанесением изоляционного слоя на специальных установках. Усилие натяга ленты при навивке — около 10 *кг/мм²*. При навивке больших сердечников его можно доводить до 40—60% от сопротивления разрыву.

Навивка сердечников с электрофорезной изоляцией происходит на электрофорезных установках со скоростью несколько метров в минуту. Установки могут быть с вертикальным и горизонтальным ходом ленты. В первом случае уменьшаются габариты установки и оказывается возможным некоторое увеличение скорости движения ленты. Однако равномерность нанесения слоя изоляции при этом ухудшается. Современные установки снабжены специальными регуляторами натяга, воздействующими непосредственно на наматываемый участок ленты, автоматическими системами слежения за правильностью укладки ленты, счетчиками витков ленты, автоматическими остановами по окончании навивки заданного диаметра сердечника и т. д.

Снимок катафорезной установки вертикального типа приведен на рис. 62.

Навивка сердечников с изоляцией методом накатывания производится на аналогичных установках с повышенной производительностью.

Отжиг сердечников. Качественный отжиг сердечников может быть произведен только в вакууме (10^{-3} *мм* рт. ст. и глубже) или в очень чистом водороде. Режим отжига приведен в табл. 14.

Таблица 14

Режим отжига

Сплав	Температура отжига, °С	Выдержка, час.	Скорость охлаждения, °С/час	Температура извлечения контейнера из печи, °С
50 Н	1100	1—1,5	100	600
80 НХС	1000—1100	2—4	100	400
79 НМ	1000	2—3	100	20—50

Время выдержки устанавливается в зависимости от размеров сердечников. Хорошее качество сердечников из 50 Н и 80 НХС получается при быстром охлаждении контейнера в воде после его извлечения из печи.

Многократный отжиг вреден. Для отжига может быть приспособлена промышленная вакуумная печь ЦЭП-301.

Прочие операции. Заключительные замечания. Пропитка сердечников осуществляется клеем БФ-4 вязкостью 80—90″ по ВЗ-4 по следующему режиму: сушка при 100°—1 час, сушка

под вакуумом (10—15 *мм* рт. ст.)—30 мин., пропитка при трехкратном чередовании вакуума (720—740 *мм* рт. ст. 7—10 мин.) и давления (2—3 *атм*, 3—5 мин.), сток излишков клея — 1 час, сушка при 80°—2 час., при 100°—1 час, при 130°—2 час. Сердечники, подлежащие резке, покрываются затем кистью или окунанием тонким слоем эпоксидного компаунда с добавкой жидкого тиокола (10%) и отвердителя — полиэтиленполиамина (8%). После покрытия — сушка при 20°—4 час. и при 100°—2 час.

Эти режимы обеспечивают полную сохранность магнитных свойств материала. Даже последующая намотка катушек непосредственно на сердечники, пропитанные этим способом, не оказывает влияния на их свойства. Лишь очень маленькие сердечники (наружным диаметром до 30 *мм*) необходимо и после пропитки помещать в защитный каркас.

Сердечники из толстых лент (0,35 *мм*) можно склеивать при помощи слоя жидкого стекла с каолином так же, как и сердечники из стальной ленты. Проводятся опыты по отжигу таких сердечников без вакуума под слоем асбеста.

Качественная резка сердечников обеспечивается только абразивными кругами (см. § 9).

Особое место занимает сплав алфенол. Он всегда имеет естественную пленку окисла и никакой дополнительной изоляции его не требуется. После отжига осуществляется закалка сердечников в масле. Ценным свойством сердечников из алфенола является высокая устойчивость к механическим воздействиям.

Процесс обработки сердечников из железоникелевых сплавов (особенно резка) оказывает на свойства сердечников более сильное влияние, чем для сердечников из трансформаторной стали. Так, удельные потери в сердечниках растут в 1,5—2,5 раза. Если не обеспечить очень высокого качества плоскости реза, то сильно упадет эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu_{эфф}$. Легко получить:

$$\mu_{эфф} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{2\delta}{l_c}}, \qquad (6)$$

где μ — магнитная проницаемость материала;
l_c — длина средней магнитной линии;
δ — зазор, на сторону, *см*.

Отсюда видно, что чем выше величина μ и меньше размеры сердечника, тем сильнее будет сказываться зазор δ. Так, при зазоре 2×15 *мк* $\mu_{эфф}$ сердечника средних размеров из сплавов 80 НХС, 79 НМ упадет по сравнению с величиной μ в 3—10 раз. Если такие снижения μ недопустимы, торцы сердечника подвергают тщательной шлифовке (притирке), позволяющей получить зазоры до 3 *мк* и добиться снижения μ всего на 10—15%.

§ 11. СВОЙСТВА ЛЕНТОЧНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Появление ленточных сердечников связано со стремлением полностью использовать текстурованные свойства ряда магнитных материалов, прежде всего — трансформаторной холоднокатаной стали. Однако преимущества этих сердечников далеко не исчерпываются этим фактом. На одно из первых мест выступают их технологические преимущества.

Возможности полной автоматизации изготовления, полное отсутствие отходов стали, легкость сборки трансформаторов, возможности использования очень тонких материалов, повышения величины $к_с$, проверки качества сердечника до сборки трансформатора открывают перед этой конструкцией широкие перспективы. В целом трудоемкость изготовления ленточных сердечников (с учетом сборки трансформатора) в два раза ниже, чем наборных сердечников из пластин, а использование материалов тоньше 0,1 *мм*, необходимых для трансформаторов ультразвуковой частоты и импульсных, возможно только в ленточной конструкции. Поэтому ленточные сердечники целесообразно изготовлять не только из текстурованных, но и из нетекстурованных материалов. Это и делается в части пермаллоев. В части же трансформаторной стали преимущественное распространение получили сердечники из холоднокатаной текстурованной стали вследствие ее высоких магнитных свойств.

Значения коэффициентов заполнения $к_с$ для ленточных сердечников приведены в табл. 15.

Таблица 15

Коэффициенты заполнения ленточных сердечников

Сердечники из холоднокатаной стали					Сердечники из железоникелевых сплавов		
толщина ленты, *мм*	способ изготовления: навивка при типах сердечников: тороидальные (О); вид изоляции ленты: катафорез	тороидальные (О); вид изоляции ленты: оксидная, тальк и т. д.	прямоугольные (П, Ш, Е)	штамповка и гибка ленты	толщина ленты, *мм*	виды изоляции: катафорез	виды изоляции: метод накатывания
0,5	—	—	—	0,95	—	—	—
0,35	—	0,93	0,92	0,93	0,1	0,85	0,9
0,15—0,2	0,88	0,93	0,88—0,9	0,9—0,91	0,05	0,75	0,85
0,08	0,87	0,92	0,85	0,87	0,02	0,6	0,7
0,05	0,8	0,87	0,75	0,85	—	—	—

Чтобы оценить магнитные свойства, необходимо учесть, что в замкнутых сердечниках при соблюдении должной технологии могут быть полностью воспроизведены свойства исходного материала (см. § 5), в сердечниках разомкнутых эти свойства неизбежно, в той или иной мере, ухудшаются. Заметим, что для получения высоких свойств всегда следует стремиться к возможно меньшей разнице длин крайних магнитных линий $l_{c\,max}$ и $l_{c\,min}$. Иначе заметно увеличивается индукция на внутренних участках сечения при уменьшенной на крайних участках. Это приводит к увеличению необходимой намагничивающей силы и потерь в сердечнике. Желательно иметь

$$\frac{l_{c\,max}}{l_{c\,min}} \leqslant 1,5. \qquad (7)$$

При плохо поставленной технологии потери и н. с. могут возрасти на 25—40%. Ухудшение свойств разъемных сердечников характеризуется ростом намагничивающего тока $I_{0\mu}$ (снижением эффективной магнитной проницаемости) и увеличением потерь. О роли зазора для сердечников из железоникелевых сплавов говорилось в § 10. У сердечников из электротехнической стали допускают обычно зазор на сторону до 20 *мк*. Степень возрастания I_0 при данном зазоре зависит от размеров сердечника и величины индукции [см. (6)]. При малых размерах и индукциях ток I_0 может возрасти в несколько раз, при больших размерах и индукциях около 17 000 *гс* рост I_0 составляет всего 5—20%.

Таблица 16

Коэффициент увеличения потерь разъемных ленточных сердечников по отношению к потерям замкнутых сердечников

Материал		Толщина ленты, *мм*	Средние значения $к_{раз}$ при частотах, *гц*				
			50	400	1000	2400	10 000 и выше
Холоднокатаная сталь ХВП	Э310—330	0,35—0,5	1,1	—	—	—	—
	Э34—36	0,15—0,2	1,1	1,12	1,2	1,25	1,3
		0,1	—	1,15	1,25	1,35	1,4
		0,05	—	1,2	1,3	1,4	1,5
Сплавы	50Н	0,05—0,1	—	1,4	1,5	1,55	1,6
	80НХС	0,05—0,1	—	2,3	2,4	2,5	2,6

Примечание. При недостаточно отработанной технологии величина $к_{раз}$ увеличивается дополнительно в 1,2—1,3 раза.

Коэффициент увеличения потерь разъемных сердечников по отношению к замкнутым $к_{раз}$ зависит от вида материала и частоты. Его средние значения для различных материалов и частот приведены в табл. 16. Однако величина $к_{раз}$ зависит от принятой технологии и в силу целого ряда причин не является стабильной. Поэтому даже при всех равных исходных условиях ленточные сердечники отличаются друг от друга качеством. Поскольку к тому же и свойства замкнутых сердечников в сильной степени зависят от принятого технологического процесса и его отработки, то коэффициент результирующего увеличения удельных потерь p_i разъемных сердечников по отношению к потерям исходного материала $к_p$ [см. (5)] колеблется в широких пределах. Меняется и степень увеличения напряженностей намагничивающего поля (удельной н. с.) $H_\sim$.

В известной мере это объясняется и тем, что технология изготовления сердечников в условиях централизованного производства находится еще в стадии становления. Поэтому по величинам p_i и $H_\sim$ сердечники разбиваются на несколько групп качества, что практически важно для сердечников из холоднокатаной стали, применяющихся в широких масштабах. При этом толщина материала специально не оговаривается, поскольку в одну группу качества могут попасть сердечники из лент разных толщин. Группы качества сердечников и соответствующие им параметры приведены в табл. 17 (нумерация групп условна).

Таблица 17

Группы качества разъемных ленточных сердечников из холоднокатаной стали

Группа качества	Частота 50 *гц*		Частота 400 *гц*		
	при индукции 15 000 *гс*		при индукции 10 000 *гс*	при индукции 15 000 *гс*	
	напряженность намагничивающего поля (удельная н. с.) $H_{\sim 15}$, *а/см*	удельные потери в сердечниках p_{15}, *вт/кг*	p_{10}, *вт/кг*	$H_{\sim 15}$, *а/см*	p_{15}, *вт/кг*
Лучшие образцы	1	1,5	8	1	18
I	2	1,9	9,5	2	21,5
II	2,7	2,3	11	2,7	25
III	2,7	2,8	13	3,5	30
IV	3,5	3,5	15	3,5	35

Примечания. 1. Напряженности $H_\sim$ даны без учета влияния зазора.
2. Для сердечников весом до 50–100 *г* удельные потери увеличиваются в 1,2–1,3 раза.

Сердечники групп I—III используются для спецаппаратуры, групп III—IV—для аппаратуры народного потребления. По мере совершенствования технологии производства группы III—IV необходимо приблизить по своим параметрам к группе II и исключить из употребления.

Интересно отметить, что у разъемных сердечников из лент 0,08 и 0,15—0,2 *мм* потери p_i еще ближе друг к другу, чем у самих материалов (см. табл. 3 и 16). Это еще раз подчеркивает нецелесообразность применения ленты 0,08 *мм* при частотах 400—500 *гц*.

Проверку величин p_i практически удобнее вести не при заданной индукции B, а при заданном потоке $\Phi \equiv \kappa_c B$. Тогда одновременно контролируется и величина κ_c.

В заключение отметим, что даже при использовании нетекстурованных материалов магнитные свойства ленточных сердечников выше, чем у наборных пластинчатых сердечников. Так, у замкнутых сердечников из железоникелевых сплавов величина μ_0 может быть выше в два раза (максимально), а у сердечников из трансформаторной стали—на 30%. При больших индукциях намагничивающий ток I_0 даже у разъемных ленточных сердечников из трансформаторной стали может быть меньше в два раза (максимально), чем у пластинчатых. Причина этого — отсутствие удвоения индукции, имеющего место у последних в местах перекрытий стыков пластин.

§ 12. КАТУШКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Намотка. Намотка отдельных проволочных катушек на специальные оправки производится на станках рядовой намотки. При намотке в каркасах обеспечивается более плотная укладка провода. Разработаны станки для одновременной намотки 15 катушек с автоматической пропиткой слоевой изоляции (ЛМ6). Бескаркасная намотка позволяет легче осуществить одновременную намотку большого числа катушек — до нескольких десятков. Намотка в этом случае идет на одну длинную бумажную шпулю, которая затем режется на нужное число частей. О способе вращающейся катушки говорилось в § 4. Скорость рядовой намотки доходит до 1500—3000 об/мин.

Для высоковольтных катушек иногда применяют намотку пирамидкой — укладку каждого витка между двумя витками предыдущего слоя, непосредственно предшествующими укладываемому витку по схеме намотки. Это позволяет снизить межслоевые напряжения до значений нескольких витковых напряжений (в зависимости от числа слоев) и обойтись без слоевой изоляции при высокой надежности катушки (см. рис. 18, справа).

Тороидальные сердечники обматываются на станках тороидальной намотки. В настоящее время создан комплекс отече-

ственных станков, позволяющих мотать провода диаметром от 0,015 до 2 *мм*. Намотка осуществляется круговым челноком, проходящим через внутреннее окно сердечника. Скорость на-

Таблица 18

Основные параметры ряда тороидальных станков

Тип станка	Наименьшая величина $d_0 = d_{0_{\min}}$, *мм*	Диаметр наматываемого провода, *мм*	Высота намотки, *мм*		Величина d_0 при $H = H_{\max}$, *мм*	Наружный диаметр после намотки, *мм*	
			при $d_0 = d_{0_{\min}}$	максимально возможная $H = H_{\max}$		наименьший	наибольший
СНТ-2	1,8	0,1—0,2	1,4	4	1,4	—	4,5
СНТ-5	5,2	0,04—0,1	6	14	12	10	20
СНТ-5М	5	0,05—0,25	12	15	7	—	85
СНТ-8	8	0,05—0,25	10	40	25	20	85
СНТ-10	10	0,1—0,5	30	48	42	—	120
СНТ-12	12	0,15—0,4	15	60	40	20	120
СНТ-14	14	0,2—0,7	40	60	18	—	120
СНТ-40	40	0,6—2,2	100	126	45	—	200
ПНТ-1	25	0,4—2	25	100	—	35	300

мотки 250—300 об/мин, намечается ее увеличение до 600—1000 об/мин. После намотки в окне неизбежно остается отверстие диаметром d_0, определяемое данными челнока. Основные параметры ряда тороидальных станков приведены в табл. 18.

Таблица 19

Коэффициенты укладки и выпучивания

Диаметр провода, *мм*	$\kappa_{укл}$	$\kappa_{вып}$
<0,12	1,15	1,1
0,3	1,13	1,15
0,8	1,12	1,2
1,5	1,1	1,25

При намотке катушек неизбежна некоторая неплотность укладки витков, характеризуемая коэффициентом укладки $\kappa_{укл}$, а также явление выпучивания проводов, характеризуемое коэффициентом $\kappa_{вып}$. Значения $\kappa_{укл}$ и $\kappa_{вып}$ для рядовой намотки даны в табл. 19. При тороидальной намотке эти коэффициенты несколько больше. Отмеченные обстоятельства приводят к снижению плотности намотки и уменьшению максимально достижимой величины коэффициента заполнения окна $\kappa_{ок}$ у ТТ по сравнению с БТ и СТ.

Специальные виды намоток для уменьшения паразитных емкостей мы не рассматриваем.

Изоляция катушек осуществляется в соответствии с указаниями в § 3 и 7.

Величина $к_{ок}$ проволочных катушек зависит от многих факторов (см. § 26) и лежит в пределах 0,1—0,45.

Галеты для галетных трансформаторов наматывают на каркасах. При намотке провод проклеивается, обмотка высушивается и снимается с оправки достаточно прочной. Затем к обмоткам галет приклеивают контактные колодочки, к контактам которых припаивают концы галет. Первичная обмотка и галеты вторичной обмотки обволакиваются компаундами или лаками. Толщина пленки составляет 0,2—0,3 *мм*. Эта пленка обеспечивает электрическую прочность 3—5 *кв* и одновременно хорошую влагостойкость.

После надевания галет на первичную обмотку катушка в целом заключается между двумя пластмассовыми платами с контактами первичной обмотки. Платы имеют на внутренней стороне выступы, фиксирующие положение обмоток в окне сердечника. После сборки трансформатор в целом также обволакивается.

Для намотки галет разработаны станки (НТП-2), позволяющие мотать провода диаметром до 1,5—2 *мм*. Скорость намотки—до 800 об/мин. Трудоемкость изготовления галетных трансформаторов, в силу их технологических преимуществ, ниже, чем при обычном исполнении, если выпуск осуществляется небольшими сериями.

Перед намоткой галет из алюминиевой фольги последнюю предварительно анодируют, т. е. покрывают слоем окиси алюминия. Покрытие происходит в электролитической ванне в течение 2—2,5 мин. при плотности тока 1—2 $а/см^2$, электролит — растворы серной и щавелевой кислот с рядом добавок. Для повышения влагостойкости оксидированную фольгу после сушки покрывают полимеризующимся лаком. Затем ее режут на полосы нужной ширины, из которых наматывают галеты, пропитываемые лаками. Возможна также намотка широких бобин с последующей их пропиткой клеем БФ-4, резкой на галеты и травлением галет в щелочи для ликвидации витковых замыканий. Заусенцы выжигают и электрическим током.

Фольговые катушки отличаются возможностью достижения высокого коэффициента заполнения окна $к_{ок}$, доходящего до 0,6—0,8. Интересно предложенное А. Ф. Сенченковым выполнение фольговых катушек с $к_{ок}>1$, достигаемым за счет уширения фольги вне пределов окна трансформатора (рис. 63).

Каркасы и иные детали из пресс-материалов прессуют или отливают. Путем горячего прессования при температуре 150—200° и давлении 450 $кг/см^2$ прессуют порошки К-41-5, К-21-22, порошок фторопласта, полиэтиленовую крошку. Последнюю

и пресс-порошок К-21-22 можно также отливать, как и полиамидные смолы—№ 68, капрон, нейлон. Более высоких давлений требует пресс-материал АГ-4. Время прессования составляет 0,5—1 *мин/мм*. В щеках каркасов желательно иметь технологические отверстия для облегчения пропитки катушек.

Пропитка и заливка. Режимы пропиток различными лаками и компаундами приведены в табл. 20. Пропитка лаком 100 АСФ (разбавитель толуол) ведется по тому же режиму, что и лаком АФ-17, а сушка после пропитки — по режиму: 2—3 час. на воздухе, 2 час. в шкафу при 120°. Такой режим пропитки и сушки повторяется дважды, после чего следует заключительная сушка при 120° в течение 8 час.

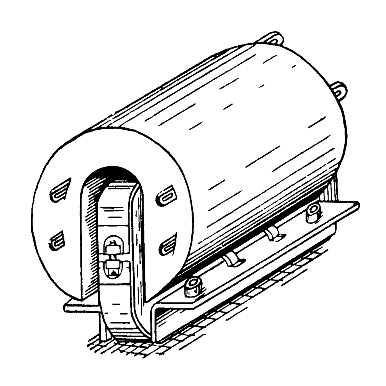


Рис. 63. Трансформатор с обмоткой из фольги с уширением ее вне окна сердечника (с коэффициентом заполнения окна $k_{ок} > 1$).

Следует подчеркнуть, что пропитка компаундами обеспечивает более высокое качество, чем лаками, поскольку из-за отсутствия летучих в изоляции после сушки не появляются поры. Совершенно исключительное место по своим технологическим свойствам занимают пропиточные компаунды КП (см. § 6), применение которых сокращает производственный цикл пропитки и сушки катушек в несколько раз по сравнению с лучшими из других составов. После предварительной сушки при 80—100° (2,5—2 час.) режим ведется следующим образом: двухкратная пропитка под вакуумом 20—40 *мм* рт. ст. (15—20 мин.) и при атмосферном давлении (15 мин.); сушка при 125° — 1 час (этот цикл может быть повторен); заключительная сушка и полимеризация при 125° — 3 час.

Прогрессивным способом сушки катушек после пропиток является сушка инфракрасными лучами небольшой длины волны. Инфракрасные лучи можно получить терморадиационным методом — при помощи плит темного излучения. Применение этого способа сокращает время сушки против приведенных в таблице и выше в 2—3 раза.

Особый интерес представляет технология применения компаундов МБК и эпоксидных. Перед использованием компаундов для заливки в их основу — смолу — вводят наполнитель (см. § 6), катализаторы полимеризации (различные перекиси, диметиланилин и др.), отвердители (полиамины, ангидриды и др.), пластификаторы, увеличивающие эластичность и в ряде случаев жизненность компаундов (дибутилфталат, трикрезилфосфат и др.). Для уменьшения вязкости и повышения жизненности

Таблица 20

Режимы пропитки катушек лаками и компаундами

Пропиточный состав		Разбавитель	Подготовка катушек	Пропитка		Режим сушки					Примечания
							Сушка в сушильном шкафу				
							После первой пропитки		После последней пропитки		
Вид	Название или обозначение			Кратность	Режим	Выдержка на воздухе, час.	Температура, °С	Время, час.	Температура, °С	Время, час.	
Лаки	447	Смесь уайт-спирита и бензина	Сушка при 110°	1–3	Вакуум 40 *мм* рт. ст. при 50—60° 5—10 мин.; затем погружением 15—20 мин. при 50—60°	0,3–0,5	75–80 (вакуум); 110 (воздух)	4 15	110 (воздух)	≧15	При плохой пропитке — тренировочный режим при 3—4 *атм* три раза по 5 мин.
	321-Т	Вода	Подогрев до 60—80°	2	Вакуум 40—50 *мм* рт. ст. 5—10 мин. или тренировочный режим при давлении 2—4 *атм* 5 мин.	0,5	120–130	4–10	120–130	12	1. Или вакуум-сушка при 80° 1—3 час. 2. Время сушки при 100—110° значительно больше
	АРБ-1	Смесь уайт-спирита и ксилола	Удаление грязи и жиров и сушка при 105—120°	2–3	Погружением или под вакуумом	1	130–140	8–10	130–140	8–10	—
	АФ-17	Ксилол	То же	2	Вакуум 30—40 *мм* рт. ст. 10—20 мин.; давление 3—4 *атм* 5—15 мин.	1	—	—	60–80 100 120	1 1 16	—
	ЭФ-3	Смесь уайт-спирита, бензина и скипидара	То же, но сушка при 160—180°	2–5	Как для лака 447	—	80–120 (запечка при 185°)	8–12	80–120 (запечка при 185°)	8–12	—

Пропиточный состав		Разбавитель	Подготовка катушек	Пропитка		Режим сушки					Примечания
							Сушка в сушильном шкафу				
							После первой пропитки		После последней пропитки		
Вид	Название или обозначение			Кратность	Режим	Выдержка на воздухе, час.	Температура, °С	Время, час.	Температура, °С	Время, час.	
Лаки	К-47	Этилцеллозольв	—	2	Как для лака 447	3	100—120, 150—160 или 200	2—3 8—12 6—8	100—120, 150—160 или 200	2—3 8—12 6—8	Желательна вакуум-сушка
	К-55, К-57	Толуол	—	—	То же	—	Запечка при температуре не ниже рабочей				Желательно превышение рабочей температуры на 30—50°
	КГМС	—	Сушка и охлаждение	—	Тренировочный режим при комнатной температуре: 5—10 мин. вакуум 10—15 *мм* рт. ст., 40—50 мин. под давлением 2—3 *атм*	Дать стечь компаунду	—	—	—	—	Режим полимеризации отрабатывается для конкретных условий
Компаунды	МБК	—	Сушка при 110° (лучше под вакуумом) и охлаждение	1—2	Компаунд при комнатной температуре; вакуум * 5—10 *мм* рт. ст. 5—10 мин; при больших габаритах тренировочный режим	То же	При горячем отверждении 70—75 110—135	10—18 4—8	70—75 110—135	10—18 4—8	Если пропитка предшествует заливке, сушка не производится

Продолжение табл. 20

Пропиточный состав		Разновидность	Подготовка катушек	Пропитка		Режим сушки					Примечание
						Выдержка на воздухе, час.	Сушка в сушильном шкафу				
							После первой пропитки		После последней пропитки		
Вид	Название или обозначение			Кратность	Режим		Температура, °С	Время, час.	Температура, °С	Время, час	
Компаунды	Эпокси	С малеиновым отвердителем	Сушка при 110° (лучше под вакуумом) и охлаждение	1—2	Компаунд при температуре 60—80°; вакуум * 5—10 *мм* рт. ст. 5—10 мин, при больших габаритах тренировочный режим	Дать стечь компаунду	120 140	2 2	120 140	2 2	1. Если пропитка предшествует заливке, сушка не производится 2. При отвердителе фталевом ангидриде температура пропитки и сушки повышается
		Полиэфирно-стирольный компаунд	То же	1—2	То же	То же	100	4	100	4	1. Если пропитка предшествует заливке, сушка не производится 2 Возможно холодное отверждение (хуже)

* Имеется в виду всасывание под вакуумом.

компаундов целесообразно также введение реактивных разбавителей, например бутилглицедилового эфира.

Отвердители являются наиболее токсичными компонентами компаундов. Наиболее распространенные отвердители — малеиновый и фталевый ангидриды, причем первый несколько более токсичен. Предприняты попытки разработать нетоксичный отвердитель. Пластификаторы возможны как химически не связанные с основой (дибутилфталат и аналоги), так и связанные (полиэфиры). Первые со временем могут выпотевать из компаундов.

По способу полимеризации (отверждения) различают компаунды горячего и холодного отверждения. Горячее отверждение обеспечивает более высокое качество заливок и пропиток. Эпоксидные компаунды горячего отверждения создаются преимущественно на основе смолы Э-37 и ЭД-6, холодного отверждения — смолы ЭД-5, которая менее вязка, с добавкой полиэтиленполиамина. Для осуществления холодного отверждения компаунда МБК в него вводят перекись бензоила и диметиланилин с сиккативами.

Заливка производится вакуумированным (под вакуумом 3—15 *мм* рт. ст.) компаундом предпочтительно под вакуумом же в стальных, дюралевых (литых) или жестяных формах. Последние применяются при макетировании, отработке конструкции и используются только один раз. Рабочие поверхности стальных и дюралевых форм во избежание сварки с компаундом покрывают кремний-органической смазкой СКТ, полиизобутиленом и другими составами. Перед заливкой все заливаемые конструктивные детали (прокладки, каркасы) опескоструивают. Катушки обезжиривают (загрязненность мешает сварке с компаундом), продувают сухим сжатым воздухом и высушивают (при наличии в конструкции бумаги — под вакуумом).

Приводим наиболее распространенные схемы заливок. Для эпоксидных компаундов: заливка нагретого компаунда при температуре 80—120° в нагретую форму и полимеризация (отверждение) при этой температуре в течение 5—48 час. в зависимости от состава массы и габаритов заливаемого объекта (существуют и компаунды холодного отверждения, например ЭДМ-200).

Для компаунда МБК: заливка холодного компаунда в нагретую форму, охлаждение при комнатной температуре, вакуумирование при 5—20 *мм* рт. ст. в течение 0,5—1 час., выдержка при 70—75° в течение 10—18 час. и полимеризация при 100—130° в течение 8 час. Возможно и холодное отверждение компаунда МБК. С этой целью в него вводят перекись бензоила и диметиланилин, заливку ведут в холодную форму и изделия после вакуумирования выдерживают при комнатной температуре (6—18 час.) в атмосфере углекислого газа или азота.

Если заливке предшествует пропитка, то после пропитки излишний компаунд сливается. Следует иметь в виду, что при этом возможно образование воздушных пузырей, ухудшающих качество изоляции. Тем не менее отверждение пропиточной массы до заливки нецелесообразно, так как из-за повышенной хрупкости может произойти ее растрескивание. Более качественна (но и более трудоемка) пропитка по методу вытеснения, когда компаунд после пропитки не сливается, а вытесняется в процессе последующей заливки.

Для обеспечения высокой электрической прочности между обмотками можно применять поочередную заливку сначала одной, а затем, после нанесения на нее второй обмотки, и этой второй обмотки. В этих случаях поверхность первой залитой катушки должна быть опескоструена.

Осуществление противокоронирующих покрытий поверхностей залитых катушек возможно методами шоопирования (металлизация распылением), гальванохимического осаждения металла или нанесением полупроводящих составов — взвесей бронзовой пудры или графита в связующей основе (различные покрывные лаки и эмали, желательно — эпоксидные).

Обволакивание может осуществляться различными материалами. При использовании эпоксидных компаундов желательно смешивать их с другими составами, например тиоколом (при горячем отверждении), полиамидом (при холодном отверждении). Перспективно пресс-обволакивание термопластичными смолами (полиамидами), полиэтиленом низкого давления, полипропиленом. Основная возникающая при этом трудность — герметизация выводов.

Из различных способов обволакивания приведем один из возможных вариантов при использовании компаунда МБК. Катушки бескаркасной намотки предварительно пропитывают под вакуумом (например, масляно-битумным лаком № 462П), затем их торцы заделывают пастой на основе компаунда МБК и катушки сушат. Собранный трансформатор погружают на 3—5 мин. в отвакуумированный состав — смесь компаунда со слюдяной мукой. Сушку и полимеризацию ведут при 140° в течение 2—3 час.

Этот цикл повторяют дважды. В заключение покрытие лакируют компаундом. Такой режим обеспечивает достаточно толстый и надежный слой покрытия и высокое качество влагозащиты.

§ 13. СБОРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

О сборке трансформаторов говорилось в гл. II. При сборке трансформаторов на разъемных ленточных сердечниках усилие стяжки должно быть достаточным для получения минимального

зазора в стыке и, с другой стороны, не превышать величин 10—12 *кГ* на *см*^{2} поперечного сечения стержня. При бо́льших давлениях начинается ухудшение магнитных свойств сердечников. Для фиксации усилия стяжки применяют тарированные ключи. Кроме того, качество стяжки проверяется по величине тока намагничивания (тока холостого хода) трансформатора.

ГЛАВА V

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

§ 14. ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА Т. М. М.

Теория т. м. м. может быть целиком построена на основе общей теории трансформаторов. Физические процессы при холостом ходе, нагрузке и коротком замыкании будут те же, что и в обычных мощных трансформаторах. Однако количественные соотношения отдельных важных факторов, определяющих рабочий процесс, будут существенно иными. Благодаря этому теряет силу ряд допущений, принимаемых обычно в общем анализе, и становятся возможными другие допущения.

При изложении материала трансформатор, кроме оговариваемых случаев, будем считать двухобмоточным и приведенным к первичной обмотке, а плотности тока в обмотках одинаковыми.

Выведем выражение для электромагнитной мощности трансформатора P, широко используемое в дальнейшем. Очевидно,

$$P = mEI, \tag{8}$$

где

P — электромагнитная мощность, *ва*;
m — число фаз;
E — э. д. с. обмотки, *в*;
I — приведенный вторичный ток, *а*.

Но

$$\left.\begin{aligned} E &= 4{,}44 f w s_c \kappa_c B 10^{-8}; \\ I &= jq. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Здесь w — число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки;
s_c — сечение сердечника геометрическое, *см*^{2};
κ_c — коэффициент заполнения сердечника;
B — амплитуда индукции, *гс*;
j — плотность тока, *а/мм*^{2};
q — полное сечение параллельно соединенных проводников обмотки, *мм*^{2}.

Если считать, что от приходящейся на одну фазу площади окна сердечника $s_{ок}$ ($см^2$) вторичные обмотки занимают часть, равную $\frac{1}{n}$ (n обычно близко к 2), то можно записать, что

$$q = \frac{1}{n} \frac{к_{ок} s_{ок}}{w 10^{-2}}, \qquad (10)$$

где $к_{ок}$ — коэффициент заполнения окна. Подставляя (9) и (10) в выражение для мощности, получим

$$P = \frac{4,44}{n} m f к_с к_{ок} s_c s_{ок} j B 10^{-6}. \qquad (11)$$

Это выражение показывает, что при данных коэффициентах заполнения и при условии постоянства электромагнитных нагрузок j и B мощность трансформатора пропорциональна произведению площадей сердечника и окна $s_c s_{ок}$. Правильный выбор величин j и B является одной из важных задач, решаемых тем или иным путем в зависимости от условий, как это будет показано ниже. Можно также видеть, что при данных размерах ($s_c s_{ок}$ = = const) мощность P увеличивается с увеличением частоты f. Следовательно, для реализации равной мощности на повышенной частоте требуются значительно меньшие габариты и вес трансформатора, чем на частоте 50 *гц*. В этом — основное преимущество трансформаторов повышенной частоты, которые в настоящее время все шире применяются в авиации, на флоте и во многих других областях техники. Наибольшее распространение получила частота питания 400 *гц*. Начинают применяться также частоты 1000 *гц* и выше.

Частота питания оказывает глубокое влияние на характеристики т. м. м., к рассмотрению особенностей которых в различных режимах работы мы и приступаем. При этом рассмотрении введем для обозначения размеров трансформатора, как это обычно делается, обобщенный линейный размер l.

Режим холостого хода. В мощных трансформаторах выбор величины индукции B в сердечнике целиком определяется задаваемыми потерями холостого хода. Величина этих потерь устанавливается из чисто экономических соображений — оптимального сочетания стоимости трансформатора и потерь энергии при его эксплуатации. В отдельных случаях величина потерь ограничивается нагревом сердечника. Практические значения индукции лежат в пределах 10 000—15 000 *гс* для горячекатаных и 13 000—17 000 *гс* для холоднокатаных сталей. При таких индукциях у мощных трансформаторов намагничивающий ток (а также ток холостого хода) оказывается весьма малым по сравнению с номинальным током — не превышающим 2—10%. Поэтому в инженерных расчетах его практически можно не учитывать. Иначе обстоит дело в рассматриваемом случае.

Действительно, относительный намагничивающий ток

$$i_0 = \frac{I_0}{I} = \frac{I_0 E}{IE} = \frac{P_0}{P} . \qquad (12)$$

Здесь I_0 — полный намагничивающий ток; P_0 — намагничивающая мощность. Мощность P_0 выражается при данной индукции B через удельную намагничивающую мощность Q

$$P_0 = Q(B) G_c 10^{-3}, \qquad (13)$$

где G_c — вес стали сердечника, *г*.

Как и для мощных трансформаторов, главное значение при намагничивании сердечника имеет намагничивающая составляющая тока и мощности — $I_{0\mu}$ и $P_{0\mu}$, активная же составляющая I_{0a} (P_{0a}) по отношению к намагничивающей не превышает 3—10% на частоте 50 *гц* и 10—50 % на повышенных частотах. Намагничивающая составляющая определяется величиной напряженности магнитного поля и мало зависит от частоты. Из (11) — (13) получаем

$$i_0 \equiv \frac{Q(B)}{Bf} \frac{G_c}{s_c s_{ок}} .$$

Поскольку вес пропорционален третьей степени линейного размера l, а величина $s_c s_{ок}$ — его четвертой степени, имеем

$$i_0 \equiv \frac{1}{fl} \frac{Q(B)}{B} . \qquad (14)$$

Таким образом, при данной частоте f и выбранной индукции B с уменьшением размеров трансформатора l (т. е. его мощности) намагничивающий ток возрастает.

В малых трансформаторах ток i_0 может достигнуть недопустимых значений. Поэтому индукцию уже приходится выбирать не из условий допустимых потерь, а исходя из допустимой величины тока намагничивания. Практически это приводит к тому, что в определенной зоне мощностей индукцию приходится сохранять постоянной, а при самых малых мощностях — даже несколько уменьшать. При этих индукциях потери в сердечнике оказываются малыми и не оказывают заметного влияния на режим работы т. м. м.

Однако при повышении мощности до некоторой критической величины P_B потери в сердечнике* p_c могут превысить допустимые из условий нагрева. Поскольку

$$p_c \equiv B^2 G_c; \quad G_c \equiv l^3,$$

* Термин «потери в стали» не применяется, поскольку сердечник может выполняться из различных материалов.

а поверхность охлаждения $\Pi \equiv l^2$, индукцию B при мощностях $P > P_B$ приходится снижать с ростом мощности (l) для сохранения заданного перегрева. Мощность P_B при частоте 50 *гц* достаточно велика.

Кривая индукций т. м. м. нанесена сплошной линией на рис. 64. При таких индукциях рост i_0 с уменьшением размеров замедляется, но в соответствии с (14) по-прежнему имеет место, и в самых малых трансформаторах величина i_0 достигает значений 50—70%, а иногда и 100%. Характер зависимости намагничивающего тока от мощности показан на рис. 65.

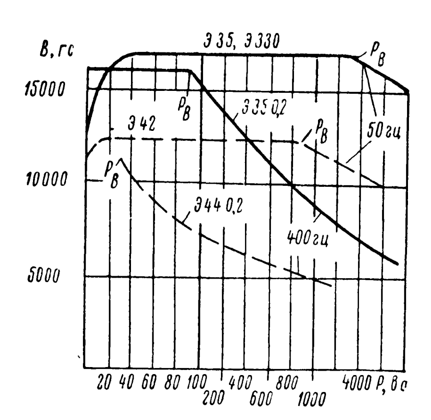


Рис. 64. Зависимость индукции от мощности для т. м. м. В зоне $P > P_B$ $\Delta\tau_к = 50°$.

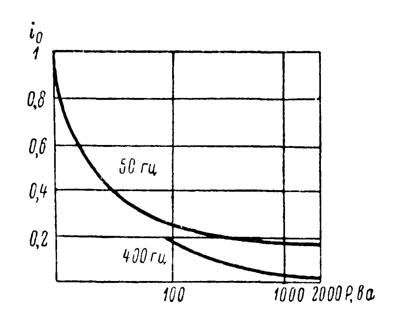


Рис. 65. Зависимость намагничивающего тока от мощности т. м. м.

Большое влияние на величину намагничивающего тока оказывает частота. Из (14) следует, что при данных размерах на повышенной частоте величина i_0 будет ниже, чем на частоте 50 *гц*, не менее чем в $\frac{f}{50}$ раз. Можно также установить, что и при равной мощности ток намагничивания на повышенной частоте будет значительно меньше, чем на частоте 50 *гц*. Если учесть, что $l \equiv \sqrt[4]{s_c s_{ок}}$, подставить сюда $s_c s_{ок}$ из (11) и решить полученное выражение совместно с (14), то

$$i_0 \equiv \frac{1}{\sqrt[4]{Pf^3}} \frac{Q(B)}{\sqrt[4]{B^3}},$$

что и подтверждает приведенный вывод.

В резком уменьшении намагничивающего тока заключается второе преимущество т. м. м. повышенной частоты. Поскольку у трансформаторов повышенной частоты, с одной стороны, большую роль играют потери в сердечнике, с другой стороны, при равной мощности уменьшается намагничивающий ток, то критическая мощность P_B, при которой приходится переходить к выбору

индукции, исходя из величины намагничивающего тока, сдвигается существенно в сторону меньших мощностей. Кривые индукции и намагничивающего тока при повышенных частотах приведены также на рис. 64 и 65.

Таким образом, для т. м. м. большую роль играет величина намагничивающего тока, особенно на частоте 50 *гц*. Поэтому пренебрегать им даже при инженерных расчетах недопустимо.

Отметим, в частности, что если у мощных трансформаторов ток холостого хода $I_{0хх}$ и намагничивающий ток при нагрузке I_0 практически совпадают, то у т. м. м. из-за увеличенного падения напряжения (см. ниже) между этими токами, а также между их активными и реактивными составляющими возможны весьма существенные различия.

Режим короткого замыкания. Режим короткого замыкания, как известно, целиком определяется сопротивлениями короткого замыкания — реактивным сопротивлением рассеяния $x_к$ и активным сопротивлением $r_к$. Сопротивление $r_к$ в основном обусловливается активными сопротивлениями обмоток. Полное сопротивление короткого замыкания определяется выражением

$$z_к = \sqrt{x_к^2 + r_к^2} .$$

В трансформаторах большой мощности главную роль играет реактивное сопротивление, так как $x_к > r_к$ и в большинстве случаев $z_к \approx x_к$. Соответственно для относительных напряжений короткого замыкания (по отношению к подведенному напряжению U_1) — активного

$$u_{кa} = \frac{Ir_к}{U_1} ,$$

реактивного

$$u_{кx} = \frac{Ix_к}{U_1}$$

и полного

$$u_к = \frac{Iz_к}{U_1}$$

— имеем $u_{кx} > u_{кa}$ и $u_к \approx u_{кx}$. Величины $u_{кx}$ и $u_к$ составляют при этом около 0,05—0,1.

Иная картина наблюдается у т. м. м. Определим принципиальную зависимость величин $u_{кa}$ и $u_{кx}$ от мощности трансформатора. В первом приближении можно положить, что напряжение U_1 равняется э. д. с. обмотки ($U_1 = E$). Тогда выражения для $u_к$ запишутся

$$u_{кa} = \frac{Ir_к}{E} ; \quad u_{кx} = \frac{Ix_к}{E} . \tag{15}$$

Рассмотрим сперва величину $u_{\text{к}a}$. Из выражения для потерь в катушках *

$$p_{\text{к}}=I^2r_{\text{к}}$$

(на фазу) можно получить

$$Ir_{\text{к}}=\frac{p_{\text{к}}}{I}.$$

Тогда по (15)

$$u_{\text{к}a}=\frac{p_{\text{к}}}{IE}=\frac{p_{\text{к}}}{\frac{P}{m}}. \tag{16}$$

Воспользуемся широко известным выражением

$$p_{\text{к}}=j^2\rho\text{к}_{\text{ок}}V_{\text{к}}, \tag{17}$$

где

j — плотность тока, $a/мм^2$;

ρ — удельное сопротивление материала проводника, $ом \cdot мм^2/м$;

$\text{к}_{\text{ок}}$ — коэффициент заполнения окна;

$V_{\text{к}}$ — объем, занятый катушками трансформатора, $см^3$ (на фазу).

Подставляя в (16) $p_{\text{к}}$ по (17) и P по (11), получаем

$$u_{\text{к}a}\equiv\frac{j}{fB}\frac{V_{\text{к}}}{s_{\text{с}}s_{\text{ок}}}. \tag{18}$$

В (18) $V_{\text{к}}\equiv l^3$; $s_{\text{с}}s_{\text{ок}}\equiv l^4$, откуда

$$u_{\text{к}a}\equiv\frac{j}{fB}\frac{1}{l}. \tag{19}$$

Следовательно, при прочих равных данных активное падение напряжения с уменьшением размеров трансформатора, т. е. его мощности, возрастает.

Непосредственная связь $u_{\text{к}a}$ с мощностью может быть установлена так же, как это было сделано выше при рассмотрении тока намагничивания, т. е. путем замены l через P по (11). Тогда получим

$$u_{\text{к}a}\equiv\frac{1}{\sqrt[4]{P}}\frac{\sqrt[4]{j^3}}{\sqrt[4]{f^3B^3}}. \tag{20}$$

Из этого выражения следует также, что при равных мощностях величина $u_{\text{к}a}$ уменьшается с ростом частоты. Поэтому на повышенных частотах величина $u_{\text{к}a}$ будет в несколько раз мень-

* Термин «потери в меди» не применяется, поскольку для проводников катушки возможно применение и алюминия.

ше, чем при 50 *гц*. Соответственно уменьшаются потери $p_к$ и растет к. п. д. трансформатора. В этом состоит третье преимущество трансформаторов повышенной частоты. Тем не менее даже для них при малых мощностях величина $u_{ка}$ достигает больших величин, в несколько раз превышающих таковые для мощных трансформаторов. На частоте 400 *гц* эта величина при нормальном перегреве обмоток может доходить до 10—20%, а на частоте 50 *гц* — до 40—60%. Для мощных же трансформаторов эта величина не превышает 1—5%. Вид зависимости $u_{ка}$ от мощности показан на рис. 66.

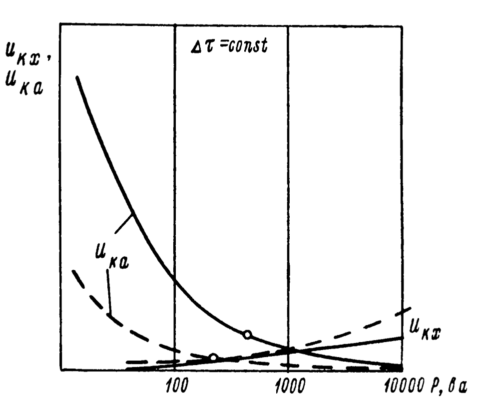


Рис. 66. Зависимость от мощности трансформатора активных и реактивных падений напряжения.
———— — 50 *гц*; — — — — — 400 *гц*.

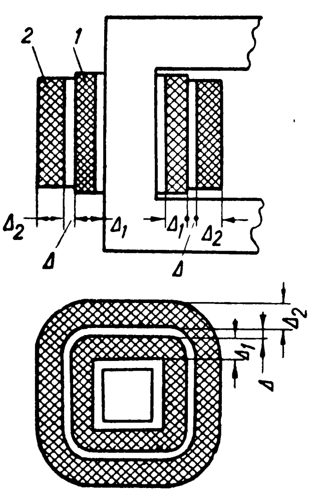


Рис. 67. К определению величины $u_{кx}$
1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка.

Для реактивного падения напряжения $u_{кx}$ при концентрических обмотках известно выражение

$$u_{кx} = \frac{2w\Delta' l_к I}{1{,}11 к_с s_c l_s B m'}, \qquad (21)$$

где

Δ' — приведенное расстояние между обмотками, *см*;
$l_к$ — средняя длина витка катушки, *см*;
l_s — длина путей рассеяния, *см*;
m' — число стержней, несущих обмотку.

$$\Delta' = \Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3}.$$

Величины Δ и l_s показаны на рис. 67.

Практически за величину l_s можно принимать высоту окна сердечника h. Выражая $I = jq$ по (9), получим в числителе

множитель $wql_{\text{к}}$, пропорциональный объему катушки $V_{\text{к}}$. Так как $V_{\text{к}} \equiv l^3$, а величина $s_c\, l_s$ в знаменателе также пропорциональна l^5, окончательно

$$u_{\text{к}x} \equiv \frac{j\Delta'}{B}. \tag{22}$$

Естественно, что с уменьшением размеров трансформатора уменьшаются величины Δ_1, Δ_2 и Δ'. Принципиальная зависимость $u_{\text{к}x}$ от мощности при постоянных j показана на рис. 66.

Мы пришли к весьма важным результатам: с уменьшением мощности величина $u_{\text{к}a}$ растет, а $u_{\text{к}x}$ падает. Поэтому, если при большой мощности $u_{\text{к}x} > u_{\text{к}a}$, то с ее уменьшением эти величины

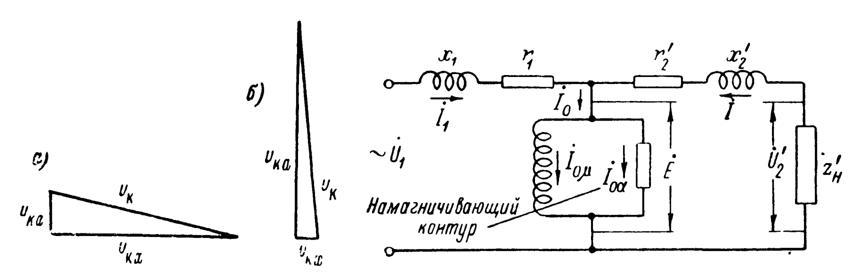


Рис. 68. Треугольники короткого замыкания: *а* — мощный трансформатор; *б* — т. м. м.

Рис. 69. Эквивалентная электрическая схема т. м. м.

начинают сближаться, сравниваются и взаимно меняются местами. Поскольку при повышенной частоте $u_{\text{к}a}$ меньше, чем при 50 *гц*, то равенство между $u_{\text{к}a}$ и $u_{\text{к}x}$ при повышенной частоте наступает при меньших мощностях. Равенство $u_{\text{к}a} = u_{\text{к}x}$ при частоте 50 *гц* осуществляется при мощностях в несколько киловольт-ампер, а при частоте 400 *гц* — в несколько сот вольт-ампер. Таким образом, для частоты 50 *гц* практически во всем диапазоне мощностей т. м. м., а для частоты 400 *гц* в большинстве случаев активное сопротивление имеет главенствующую роль по сравнению с реактивным сопротивлением рассеяния. В большинстве случаев при анализе и расчетах т. м. м. реактивным сопротивлением можно пренебречь и учитывать только активное сопротивление.

Итак, для т. м. м. в большинстве случаев $z_{\text{к}} \approx r_{\text{к}}$ и $u_{\text{к}} \approx u_{\text{к}a}$ — результат, прямо противоположный тому, что имеет место в мощных трансформаторах. Лишь для трансформаторов больших мощностей на 400 *гц* и для трансформаторов более высоких частот эти соотношения теряют силу.

Вид треугольников короткого замыкания малого т. м. м. и мощного трансформатора показан на рис. 68.

Из-за значительной величины сопротивления $r_к$ ток эксплуатационного короткого замыкания у т. м. м. во много раз меньше, чем у мощных. Поэтому динамические усилия, действующие на проводники, опасности здесь не представляют. Однако термические последствия подобного короткого замыкания приводят к выходу трансформатора из строя, почему его необходимо всячески избегать.

Работа трансформатора под нагрузкой. Полная схема замещения трансформатора представлена на рис. 69. Обозначения приведенных величин, как обычно, снабжены штрихом, параметров первичной и вторичной обмоток — индексами 1 и 2.

Для мощных трансформаторов во многих случаях вполне допустимо пользоваться упрощенной схемой, в которой исключается намагничивающий контур ввиду небольшого значения тока намагничивания. Для т. м. м. подобное упрощение допустимо только для относительно больших мощностей, примерно начиная с величины $P = P_B$ и выше (см. рис. 64 и 65). В большинстве же случаев ток намагничивания необходимо учитывать.

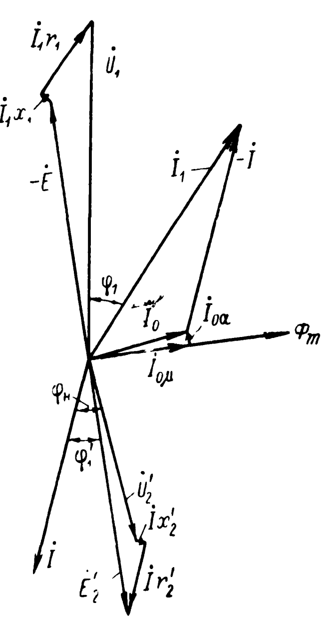


Рис. 70. Векторная диаграмма т. м. м.

Полная векторная диаграмма т. м. м. приведена на рис. 70. В соответствии с полной схемой замещения и векторной диаграммой необходимо рассчитывать и падение напряжения в трансформаторе при нагрузке. Можно написать следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}=\dot{E}_2'=\dot{U}_2' + \dot{I}\left(r_2' + jx_2'\right), \\ \dot{U}_1= -\dot{E} + \dot{I}_1\left(r_1 + jx_1\right), \end{aligned}\right\} \qquad (23)$$

причем

$$\dot{I}_1 = -\dot{I} + \dot{I}_0, \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_{0\mu} + \dot{I}_{0a}.$$

Разлагая все векторы на активные и реактивные составляющие, можно найти по векторной диаграмме:

$$E=E_2'=\sqrt{\left(U_2'\cos\varphi_н + Ir_2'\right)^2 + \left(U_2'\sin\varphi_н + Ix_2'\right)^2}, \qquad (24)$$

где $\varphi_н$ — фазовый угол нагрузки.

Таким же образом

$$U_1 = \sqrt{[E + (I\cos\varphi' + I_{0a})\,r_1 + (I\sin\varphi' + I_{0\mu})\,x_1]^2 + + [(I\cos\varphi' + I_{0a})\,x_1 - (I\sin\varphi' + I_{0\mu})\,r_1]^2}\,. \qquad (25)$$

Угол φ' есть угол между векторами $\dot{E}_2'$ и $\dot{I}$.

Из диаграммы

$$\varphi' = \operatorname{arc\,tg}\frac{Ix_2' + U_2'\sin\varphi_н}{Ir_2' + U_2'\cos\varphi_н}. \qquad (26)$$

По формулам (24) — (26) может быть произведено точное вычисление падения напряжения $\Delta U = U_1 - U_2'$. Однако подобные вычисления весьма затруднительны и в большинстве практических случаев являются излишними. Дело в том, что т. м. м. работают, как правило, на активную нагрузку или нагрузку с малой реактивной составляющей ($\varphi_н \approx 0$). Поэтому угол φ' по (26) близок к нулю, тем более что величина x_2' мала. Пренебрегая углом φ', можно получить непосредственно для падения напряжения из векторной диаграммы, опуская члены второго порядка малости,

$$\Delta U = U_1 - U_2' \approx I_1 r_1\cos\varphi_1 + I_1 x_1\sin\varphi_1 + Ir_2'\cos\varphi_н + Ix_2'\sin\varphi_н. \qquad (27)$$

Переходя к относительным единицам, получим

$$\Delta u = u_{a1}\cos\varphi_1 + u_{x1}\sin\varphi_1 + u_{a2}\cos\varphi_н + u_{x2}\sin\varphi_н. \qquad (28)$$

Здесь

$$u_{a1} = \frac{I_1 r_1}{U_1};\quad u_{x1} = \frac{I_1 x_1}{U_1}$$

и т. д.

Согласно векторной диаграмме

$$I_1 = \sqrt{(I\cos\varphi_н + I_{0a})^2 + (I\sin\varphi_н + I_{0\mu})^2}\,. \qquad (29)$$

Значения токов I_{0a} и $I_{0\mu}$ находят при расчете магнитной цепи. Угол φ_1 отличается от угла $\varphi_н$ практически вследствие влияния активных падений напряжения с одной стороны и тока намагничивания — с другой. Он может быть определен из равенства

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_{1a}}{U_1 I_1} = \frac{P_2 + \Sigma p}{U_1 I_1},$$

где Σp — суммарные потери в трансформаторе.

Основное отличие формулы (28) от аналогичной для мощных трансформаторов состоит в том, что в ней учитываются падения напряжения раздельно по обмоткам для учета различия токов

I и I_1 и углов $\varphi_н$ и φ_1. В этом проявляется специфика т. м. м.— влияние активных сопротивлений и тока намагничивания. Однако и формула (28) может быть во многих случаях упрощена. Так, при чисто активной нагрузке

$$\cos\varphi_н=1;\quad \sin\varphi_н=0;$$
$$\Delta u=u_{a1}\cos\varphi_1+u_{x1}\sin\varphi_1+u_{a2};$$
$$\Delta U=I_1r_1\cos\varphi_1+I_1x_1\sin\varphi_1+Ir_2'.$$

Легко заметить, что здесь практически

$$I_1\cos\varphi_1=I+I_{0a};\quad I_1\sin\varphi_1=I_{0\mu}\approx I_0.$$

Поэтому

$$\Delta U=\left[(I+I_{0a})\,r_1+Ir_2'+I_0x_1\right]=Ir_к+I_{0a}r_1+I_0x_1. \qquad (30)$$

В (30) два последних члена значительно меньше первого, ибо $I_0<I$, $I_{0a}\ll I$ и, как было показано выше, $x_1<r_к$. Даже в самых малых трансформаторах, где ток I_0 может приближаться к I, справедливо $I_0x_1\ll Ir_к$, поскольку одновременно с ростом I_0 падает сопротивление рассеяния (см. рис. 65 и 66).

Если даже речь идет о больших трансформаторах на 400 *гц* или трансформаторах более высоких частот, то и здесь, несмотря на соотношение $x_1\gg r_к$, по-прежнему можно пренебречь членом I_0x_1, ибо при этих условиях очень мал ток I_0.

Следовательно, с достаточной точностью во всех случаях, когда

$$\cos\varphi_н=1,\quad \Delta U\approx Ir_к. \qquad (31)$$

В относительных единицах это будет $\Delta u=u_{кa}$.

Отсюда вытекает важный вывод, что при активной нагрузке падение напряжения практически не зависит от намагничивающего тока.

На практике часто вместо (31) пользуются равенством

$$\Delta U=I_1r_1+Ir_2' \text{ или } \Delta u=u_{a1}+u_{a2}. \qquad (32)$$

Падения напряжения отдельно по обмоткам: первичной — ΔU_1 и вторичной — ΔU_2 подсчитывают при этом как I_1r_1 и I_2r_2, где I_2 — реальный ток вторичной обмотки; r_2 — ее реальное сопротивление.

Некоторое увеличение расчетного падения напряжения за счет введения тока

$$I_1=\sqrt{(I+I_{0a})^2+I_{0\mu}^2}$$

вместо I компенсирует ошибку, возникающую при пренебрежении членами I_0x_1 и $I_{0a}r_1$ в (30) и переходе к выражению (31).

Заключительные замечания. Из рассмотренных особенностей можно заключить, что специфика т. м. м. находит наибольшее проявление на нормальной частоте 50 *гц*. Трансформаторы же на повышенные частоты по количественным соотношениям различных параметров стоят ближе к обычным мощным трансформаторам, лишь потери в сердечнике у них играют значительно большую роль.

§ 15. ТРЕБОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАСЧЕТ Т. М. М.

При проектировании т. м. м., как и всех других, должен быть обеспечен определенный **тепловой режим** их работы. Основной характеристикой теплового состояния т. м. м. является перегрев катушек трансформатора относительно окружающей среды. При заданной температуре среды этот перегрев обусловливает рабочую температуру изоляции катушек, а температура изоляции определяет срок ее службы. Поэтому ограничение перегрева катушек не выше заданного является первым и непреложным требованием, влияющим на весь ход расчета и проектирования трансформатора или целиком их определяющим.

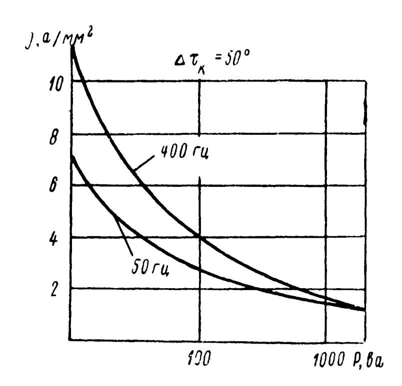


Рис. 71. Зависимость плотности тока от мощности т. м. м. при постоянном перегреве катушек. Тип трансформатора — СТ.

Рассуждения, приведенные в § 14 относительно зависимости потерь в сердечнике и индукции от мощности при $P > P_B$, могут быть повторены и в части потерь в катушке, если учесть выражение (17). Таким образом, окажется, что при заданном перегреве ($\Delta\tau_к = \text{const}$) плотность тока j с ростом размеров (мощности) должна монотонно убывать (рис. 71). Подробно тепловой режим рассматривается в § 16.

Однако требование обеспечения заданного перегрева часто оказывается не единственным. Оно может быть дополнено двумя другими требованиями — необходимостью обеспечения заданного падения напряжения и, в ряде случаев, заданного тока намагничивания. Требования эти возникают по той причине, что у т. м. м. обе эти величины существенно выше, чем у мощных трансформаторов, как это было показано в предыдущем параграфе.

Падение напряжения Δu. Для мощных трансформаторов величина $\Delta u\,(u_к)$ всегда имеет большое значение и является одним из важнейших параметров при проектировании любого трансформатора. Величины $u_к$ стандартизованы и должны выдерживаться с

очень большой точностью для обеспечения условий параллельной работы трансформаторов. Т. м. м. соединяются на параллельную работу лишь в исключительных случаях и при этом всегда однотипные, с заведомо одинаковыми параметрами. Поэтому здесь величина Δu не играет такой принципиальной роли и обычно не требуется добиваться заданной конкретной величины Δu. Однако в целом ряде случаев в задании на проектирование т. м. м. может оговариваться верхний предел величины Δu, предельно допустимое падение напряжения. Иногда этот предел устанавливается из желания сохранить на определенном уровне величину к. п. д. Однако чаще всего это объясняется необходимостью иметь стабильное напряжение на вторичных обмотках при изменении нагрузки и условий работы трансформатора. Действительно, т. м. м. могут эксплуатироваться в очень широком диапазоне температур. Трансформаторы авиационной аппаратуры, например, работают при температурах от $-60°$ до $+130-150°$, а то и выше. При таком перепаде температур сопротивление обмоток меняется очень значительно — примерно в два раза. В соответствии с (32) так же изменяется и падение напряжения Δu. У т. м. м. величина Δu может быть весьма велика, поэтому значительное изменение ее приводит к заметному изменению и вторичного напряжения. Цепи же накалов и анодов электронных и ионных приборов, питаемых от т. м. м., требуют поддержания напряжения в довольно жестких пределах (несколько процентов). Аналогичные требования предъявляют и некоторые другие потребители, особенно в схемах автоматики, управления и т. д.

Предположим, что Δu для данного трансформатора при отрицательной температуре составляет 15%. В приведенном выше примере оно может измениться в два раза, т. е. составить 30%. Следовательно, вторичное напряжение только за счет изменения температуры изменится на 15%, что во многих случаях недопустимо. Величина допустимого падения напряжения может быть различной в зависимости от назначения и условий работы трансформатора. При самых жестких требованиях по стабильности напряжения допустимая величина Δu составляет 5—10%, хотя в отдельных специальных случаях эта величина может снизиться до 1—2%. При менее жестких требованиях величина Δu может доходить до 20%. Наконец, величина Δu может вообще не ограничиваться.

По (31) в большинстве случаев $\Delta u \approx u_{ка}$. Величина же $u_{ка}$ по (20) растет с уменьшением мощности и частоты. Поэтому обеспечение заданного Δu тем труднее, чем меньше мощность трансформатора и особенно при частоте 50 *гц*. Как следует из (20), величина Δu растет с ростом плотности тока. Поэтому при постоянной величине Δu плотность тока приходится снижать по мере уменьшения мощности трансформаторов. Из (20) видно также, что при данном Δu величина j может быть допущена

большей, если трансформатор работает на более высокой частоте.

Зависимость j от мощности для разных величин Δu и частот 50 и 400 *гц* при прочих равных условиях представлена на рис. 72. Как видим, зависимость носит обратный характер по сравнению со случаем $\Delta\tau_к=\text{const}$.

При достаточно большой мощности падение напряжения всегда получается приемлемым, если трансформатор рассчитывать исходя из величины заданного перегрева катушек. В этих случаях величина Δu уже не накладывает каких-либо ограничений при проектировании. Конкретная величина таких «достаточно больших» мощностей зависит от целого ряда условий: заданной величины Δu, частоты, допустимого перегрева. Так, при перегреве 50° величина Δu не превосходит 10%, если мощность трансформатора не менее 10—15 *ва* при частоте 400 *гц* и не менее 100—150 *ва* при частоте 50 *гц*. При частотах 1000 *гц* и выше ограничения по величине Δu практически полностью снимаются.

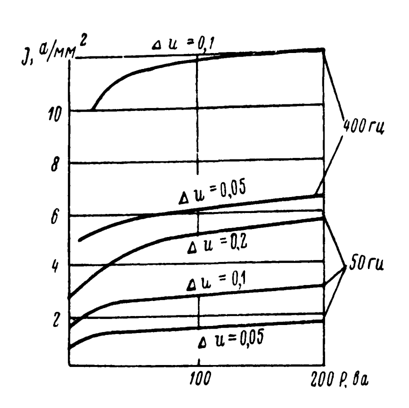


Рис. 72. Зависимость плотности тока от мощности т. м. м. при постоянном падении напряжения. Тип трансформатора — СТ.

При расчете величины Δu, если не делается иных оговорок, сопротивления обмоток в нагретом состоянии r берут при условной температуре 75° (некоторой средней из реальных).

Намагничивающий ток i_0. Как уже отмечалось, намагничивающий ток при нагрузке i_0 может достигать у т. м. м. весьма больших значений. Каким он будет — целиком зависит от проектировщика. При прочих равных условиях намагничивающий ток тем выше, чем выше принятая при расчете индукция, поскольку при этом возрастает необходимая напряженность намагничивающего поля в соответствии с кривой намагничивания сердечника. Поскольку же выбор индукции в руках проектировщика, можно говорить и о «выборе величины намагничивающего тока». Как же разумно выбрать величину i_0? Это один из важных вопросов, возникающих в теории и проектировании т. м. м. Рассматриваться он должен с двух сторон — влияния величины i_0 на показатели самого трансформатора и влияния ее на питающую сеть и источник питания.

Увеличение i_0 означает рост реактивной нагрузки в сети и снижение $\cos\varphi$ нагрузки для источника энергии. Это, разумеется, нежелательно. Поэтому, если суммарная мощность т. м. м. со-

ставляет существенную часть общей нагрузки питающего генератора, не следует допускать очень больших токов намагничивания. В этих случаях допустимая величина i_0 задается проектировщику наравне с другими исходными данными для расчета. Тогда выбор индукции целиком определяется заданной величиной тока намагничивания, если, конечно, условия нагрева не являются более жесткими (см. ниже).

Допустимая величина i_0 может колебаться от 10—20% до 100% в зависимости от условий (при i_0 свыше 100% мы по существу имеем уже не силовые трансформаторы, а трансформаторы напряжения, здесь не рассматриваемые). Если принимать i_0 постоянным, то в соответствии с (14) с уменьшением размеров трансформаторов (мощности) индукцию B необходимо уменьшать. Поскольку с уменьшением мощности влияние трансформатора на сеть уменьшается, допустимую величину i_0 можно с уменьшением мощности увеличивать. Тогда величина B в некотором интервале мощностей может оставаться постоянной и лишь при самых малых мощностях должна быть уменьшена, как это было показано на рис. 64.

Рассмотрим теперь, как должен выбираться ток i_0, если никакие внешние ограничения не имеют места. Увеличение тока i_0 позволяет выбирать бо́льшие индукции B. Увеличение индукции приводит по (20) к снижению величины $\Delta u \approx u_{\text{ка}}$. Кроме того, при данной мощности увеличение B в соответствии с (11) приводит к уменьшению величины $s_c s_{\text{ок}}$, т. е. габаритов трансформатора. Однако увеличение индукции и намагничивающего тока имеет свои разумные пределы. Рост тока i_0 означает и рост полного первичного тока I_1. Значит, будут расти и потери в катушке. Для обеспечения заданного перегрева это потребует увеличения поверхности охлаждения трансформатора, т. е. увеличения его размеров. Поэтому существует некоторое оптимальное значение i_0, обеспечивающее получение минимальных габаритов трансформаторов. Определение этого оптимального значения будет произведено в § 18.

Практически расчет индукции по величине i_0 играет решающую роль для большинства т. м. м. на частоту 50 *гц* (исключая самые большие мощности) и для очень малых трансформаторов (до 10—30 *ва*) на частоту 400 *гц*. В остальных случаях выбор индукции производят, исходя из допустимых потерь в сердечнике в связи с обеспечением заданного теплового режима трансформатора.

Заметим, что на практике часто говорят не о намагничивающем токе, а о токе холостого хода, иногда имея в виду действительно его, а иногда смешивая эти две, строго говоря, различные величины (см. § 14).

Заключительные замечания. Мы видим, что выбор величин индукции B и плотности тока j может производиться по-разному

в зависимости от поставленных условий (заданных величин $\Delta\tau_к$, Δu, i_0).

Величина j выбирается либо из условий нагрева, либо из условий падения напряжения. Величина B выбирается либо из условий нагрева, либо из условий намагничивания. В принципе возможно любое сочетание этих условий. При этом конкретные значения $\Delta\tau_к$, Δu и i_0 и сорта магнитных материалов могут быть заданы такими, что любой из этих случаев может встретиться при любой мощности и при любой частоте.

Однако практически в подавляющем большинстве случаев задаваемые $\Delta\tau_к$, Δu, i_0 лежат во вполне определенных диапазо-

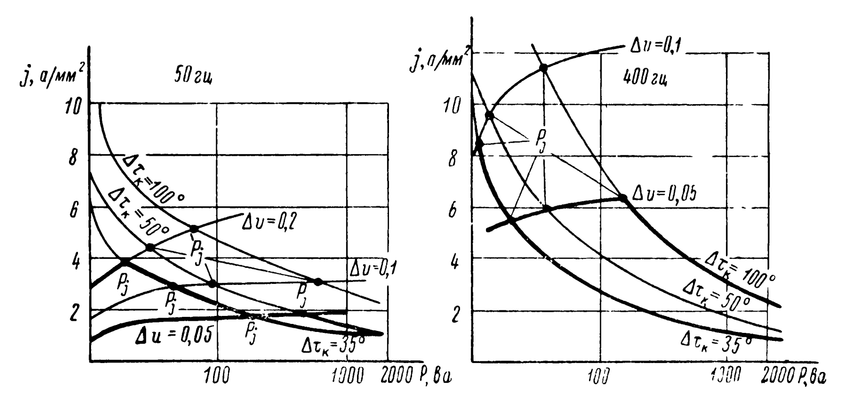


Рис. 73. К определению граничных мощностей P_j.

нах значений, приводившихся ранее. При этом оказывается, как объяснялось выше, что каждое из требований для данной частоты играет решающую роль в определенном диапазоне мощностей.

Так, падение напряжения и ток намагничивания являются лимитирующими факторами для малых мощностей и особенно при частоте 50 *гц*, перегрев обмоток — для больших мощностей. Конкретная величина пограничных мощностей для данной частоты зависит от конкретных значений заданных $\Delta\tau_к$, Δu, i_0 и может быть установлена следующим образом. Совместим на одном графике (рис. 73) рисунки 71 и 72, иллюстрирующие зависимость плотности тока от мощности при данной частоте. Точки пересечения кривых $j(P)$ при заданных Δu и $\Delta\tau_к$ и являются искомыми граничными мощностями P_j. Чем меньше Δu и выше $\Delta\tau_к$, тем больше мощность P_j. Если Δu не задается, то $P_j=0$ и величина j выбирается всегда из условий нагрева.

Граничные мощности P_B между зонами по выбору B (см. рис. 64) зависят от величины удельных потерь сердечника, т. е. от сорта и толщины материала, и от допустимых величин i_0. Чем меньше i_0 и выше удельные потери, тем левее располагаются по оси мощностей мощности P_B.

Решающее влияние на величину граничных мощностей P_j и P_B, как это видно из рис. 64 и 73, оказывает рабочая частота трансформатора. Чем частота выше, тем левее располагаются граничные мощности.

Сказанное выше о влиянии лимитирующего фактора на выбор j и B в зависимости от мощности иллюстрируется диаграммой на рис. 74 раздельно для нормальной и повышенных частот. На диаграмме указаны ориентировочные значения граничных мощностей P_j и P_B для практически наиболее часто встречающихся условий (в частности, нормальных перегревов).

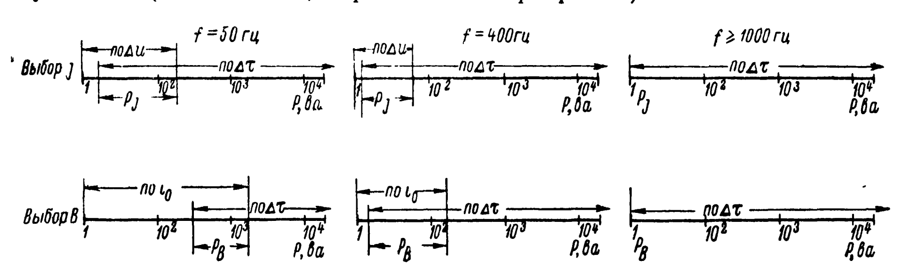


Рис. 74. Критерии выбора плотности тока и индукции для т. м. м. в зависимость от мощности т. м. м. и частоты питания.

Из диаграммы видно, что на практике в большинстве случаев для частоты 50 *гц* при выборе B главную роль играют условия намагничивания, а для повышенных частот — условия нагрева. Поэтому в дальнейшем, при теоретическом анализе, т.м.м., у которых индукция рассчитывается из условий намагничивания, будем называть трансформаторами нормальной частоты; т. м. м., у которых индукция рассчитывается из условий нагрева, будем называть трансформаторами повышенной частоты. При этом следует помнить всю условность таких определений в соответствии со сказанным выше. У т. м. м., рассчитанных на высокие перегревы, выбор B осуществляется из условий намагничивания вне зависимости от частоты питания.

С точки зрения выбора j оба случая — выбор по нагреву и падению напряжения — достаточно распространены на частотах 50 и 400 *гц*.

При высоких перегревах преобладает выбор j по величине Δu.

§ 16. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ Т. М. М.

Температура трансформатора зависит от температуры окружающий среды $\tau_{окр}$ и его перегрева (обычно $\tau_{окр}$ измеряется на расстоянии 8—10 *мм* от поверхности т. м. м.). Допустимую температуру выбирают в зависимости от срока службы и класса изоляции. При заданной $\tau_{окр}$ от этих факторов будет зависеть и

допустимый перегрев. Перегревы и $\tau_{окр}$ для ряда типовых случаев были приведены в табл. 1.

У мощных трансформаторов необходимо обращать внимание на перегрев катушек и сердечника во избежание нарушения изоляции между его листами и подогрева масла, причем перегрев сердечника устанавливается примерно на уровне перегрева катушек. Для т. м. м. перегрев сердечника представляет значительно меньший интерес. Как было показано в гл. III, отсутствие специальной изоляции пластин не приводит здесь к заметному увеличению потерь в сердечнике. Ленточные сердечники, особенно со склейкой ленты стеклоэмалями, достаточно теплостойки и, как правило, могут выдерживать значительно более высокие температуры, чем катушки. Поэтому практически у т. м. м. интересуются перегревом катушек $\Delta\tau_к$.

Существует правило, согласно которому повышение температуры изоляции класса *А* на каждые 8°, а теплостойкой изоляции — на каждые 12° сокращает срок службы изоляции вдвое. Отсюда видно, насколько важно не допускать излишнего перегрева катушек.

Для мощных трансформаторов под перегревом катушек понимают перегрев их наиболее горячих точек. Для т. м. м. ограничиваются измерениями среднего перегрева обмоток методом сопротивления, поскольку ввиду небольших размеров катушек перепад температуры по их толщине и высоте также мал (до нескольких градусов) и не имеет существенного значения. Лишь в случае тороидальных трансформаторов, где отсутствует теплоотдача с торцов, с этим перепадом приходится считаться, особенно при больших их размерах.

До настоящего времени наиболее широко в трансформаторостроении применяется класс изоляции *А*. Допустимые перегревы катушек принимаются обычно в 35—65°. Все более широкое применение находят теплостойкие изоляционные материалы, позволяющие работать при высоких температурах среды и значительно поднять перегревы — до 80—100° и выше.

Нагрев т. м. м. зависит от величины выделяющихся в нем потерь и эффективности теплоотдачи. Последняя зависит от величины поверхности охлаждения П и совокупного действия конвекции, лучеиспускания и теплопроводности. Каждый из этих факторов зависит от многих условий и различным образом, благодаря чему тепловые процессы в трансформаторах отличаются значительной сложностью. Дополнительную сложность вносит то обстоятельство, что, в отличие от мощных трансформаторов, сердечник и катушки в нашем случае нельзя считать изолированными друг от друга в тепловом отношении из-за небольших расстояний между ними. Поэтому перегрев катушек является следствием совокупного действия потерь $p_к$ и $p_с$, а между сердечником и катушкой существует теплообмен. Заметим также,

что т. м. м.— это обычно сухие трансформаторы, тепловые расчеты которых наименее отработаны.

Теоретические и экспериментальные исследования теплового режима т. м. м. проведены в Советском Союзе В. С. Овнаняном, Б. М. Цеймахом. Р. А. Лашевским, Г. И. Карповским. Е. И. Каретниковой, канд. техн. наук Б. П. Лиховецким. На основании проведенных работ и богатого практического опыта удается с достаточной для практики точностью выполнять тепловые расчеты т. м. м. Тем не менее вопрос этот следует считать еще разработанным недостаточно. Поэтому при расчетах приходится прибегать к ряду чисто экспериментальных коэффициентов.

Расчетные формулы для определения перегрева. Из теории нагрева однородного твердого тела известно, что его перегрев над окружающей средой $\Delta\tau$ (°С) может быть определен через выделяющуюся в нем мощность $p(_{вт})$, теплоемкость тела C (*вт · сек*/°С) и постоянную времени нагрева тела $T(_{мин.})$

$$\Delta\tau = 60\,\frac{pT}{C}. \tag{33}$$

При этом перепад температуры в теле не учитывается и перегрев определяется по отношению к средней температуре тела. В свою очередь

$$T = \frac{C}{60\alpha\Pi}, \quad C = cG, \tag{34}$$

где П — поверхность охлаждения тела, *см*²;
α — удельный коэффициент теплоотдачи поверхности тела, *вт/см*² · °С;
c — удельная теплоемкость тела, *вт · сек/г* °С;
G — его вес, *г*.

Удельный коэффициент теплоотдачи α показывает, какая мощность, выделяющаяся в виде тепла, может быть отведена через каждую единицу поверхности охлаждения на каждый градус ее перегрева.

Трансформатор не является однородным телом, поэтому (34) точнее записать

$$C = c_к G_к + c_с G_с + c_{из} G_{из}. \tag{35}$$

Здесь $c_к$, $c_с$, $c_{из}$ — удельные теплоемкости проводников катушки, сердечника, изоляции катушки;
$G_к$, $G_с$, $G_{из}$ — их веса на фазу, причем $G_{из} \approx 0{,}1 G_к$.

Мощностью, нагревающей трансформатор, являются потери в катушках $p_к$ и потери в сердечнике $p_с$ (на фазу). Интересуясь перегревом катушек $\Delta\tau_к$, можно написать, учитывая (33) и (35),

$$\Delta\tau_к = 60\,\frac{(p_к + p_с)\,T}{c_к G_к + c_с G_с + c_{из} G_{из}}. \tag{36}$$

Величину T находим из (34)

$$T=\frac{1}{60}\frac{C}{\alpha}\frac{G}{\Pi}, \qquad (37)$$

где G — вес трансформатора, *г*;
C — усредненная теплоемкость трансформатора в целом;
Π — суммарная поверхность охлаждения катушек и сердечника.

В первом приближении на основании опытных данных для т. м. м. можно считать $\frac{C}{\alpha}=\text{const}$, причем для частоты 50 *гц* следует принимать $\frac{C}{\alpha}=600$, для повышенных частот $\frac{C}{\alpha}=400$.

Тогда

$$\left.\begin{aligned}&\text{для 50 гц } T=10\frac{G}{\Pi},\\&\text{для повышенных частот } T=6{,}6\frac{G}{\Pi}.\end{aligned}\right\} \qquad (38)$$

Формула (36), с учетом (38), нашла некоторое распространение в практике расчетов т. м. м. При расчетах следует брать $c_к=0{,}39$; $c_с=0{,}48$; $c_{из}=2$ (пропитанная изоляция) (*вт·сек/г*° С).

Достоинством формулы (36) является учет влияния изоляции на перегрев катушек. Однако другие допущения сводят на нет это преимущество. Если от него отказаться, то формула может быть значительно упрощена. Рассматривая упрощенно трансформатор как однородное тело, подставим (34) в (33) и получим с учетом уже сделанных замечаний

$$\Delta\tau_к=\frac{p_к+p_с}{\alpha\Pi}. \qquad (39)$$

Здесь по-прежнему $p_к$ — потери в катушках, $p_с$ — в сердечнике, $\Pi=\Pi_к+\Pi_с$ — суммарная поверхность охлаждения катушек и сердечника (поверхность их открытых наружных частей) — все на одну фазу.

Уравнение (39) является хорошо известным уравнением теплового равновесия твердого тела. Эта формула нашла на практике весьма широкое распространение. Однако приемлемая точность расчета может быть обеспечена только в том случае, если правильно выбирается величина результирующего коэффициента теплоотдачи α, зависящего от очень многих факторов (см. ниже).

Иногда для расчета $\Delta\tau_к$ учитывают только $p_к$ и $\Pi_к$, полагая

$$\Delta\tau_к=\frac{p_к}{\alpha\Pi_к},$$

однако по понятным причинам это нельзя признать приемлемым. Формулы (36) и (39) страдают серьезным недостатком — не дифференцируют теплоотдачу катушек и сердечника, в то время как первая и вторая существенно отличны (коэффициент теплоотдачи сердечника выше, чем коэффициент теплоотдачи катушек). Кроме того, эти формулы не учитывают разного влияния потерь в катушке и сердечнике на нагрев катушек. Действительно, потери $p_к$ нагревают катушку непосредственно, потери же $p_с$ — либо нагревают ее косвенным путем через каркас, либо не нагревают вообще. Наконец, сердечник может даже отводить тепло от катушки — в зависимости от соотношения потерь $p_к$ и $p_с$. Так, на частоте 50 *гц* из-за малости потерь $p_с$ сердечник, как правило, нагревается катушкой и отводит от нее тепло. На повышенных частотах при интенсивном использовании сердечника может быть обратный процесс: сердечник может нагревать катушку. Однако при этом между сердечником и катушкой происходит заметный перепад температур.

Таким образом, потери в сердечнике и катушке не равноценны с точки зрения их влияния на нагрев катушек. Произведем такой опыт. Установим рабочий режим трансформатора с потерями в катушке $p_{к1}$ и в сердечнике $p_{с1}$.

Соотношение потерь

$$\nu = \frac{p_с}{p_к} \tag{40}$$

составляет

$$\nu_1 = \frac{p_{с1}}{p_{к1}}.$$

Допустим, $\nu_1 = 1$.

Сумма потерь

$$p = p_{к1} + p_{с1}.$$

Измеренный перегрев катушек в этом режиме составит $\Delta\tau_{к1}$.

Теперь изменим соотношение потерь — потери в сердечнике увеличим до $p_{с2}$, в катушке — уменьшим до $p_{к2}$, но так, чтобы сумма потерь осталась прежней:

$$p_{к2} + p_{с2} = p_{к1} + p_{с1} = p.$$

Очевидно,

$$\nu_2 = \frac{p_{с2}}{p_{к2}} > 1.$$

Следуя формулам (36) и (39), мы получили бы, что перегрев катушек остается неизменным и равным $\Delta\tau_{к1}$. Однако опыт показывает, что во втором режиме перегрев катушек уменьшается:

$$\Delta\tau_{к2} < \Delta\tau_{к1}.$$

Чем больше величина ν при данной сумме потерь, тем меньше перегрев катушек.

Сказанное иллюстрируется экспериментальными кривыми $\Delta\tau_к = f(\nu)$, приведенными на рис. 75. Кривые получены для броневых и стержневых трансформаторов на частоте 400 *гц* мощностью от 50 до 300 *ва*. Геометрия сердечников, характеризуемая по (45) параметром β (см. ниже), внутри каждого типа выбиралась различной. Из кривых видно, что у БТ падение $\Delta\tau_к$ с ростом ν более заметно, чем у СТ. Это и понятно: у БТ поверхность охлаждения сердечника относительно больше, чем у СТ. Более того, для трансформаторов данного типа разной геометрии зависимость $\Delta\tau_к$ от ν также различна: чем больше, опять-таки, относительная роль поверхности охлаждения сердечника (по отношению к поверхности охлаждения катушек), тем эта зависимость более сильно выражена. Если же взять тороидальный трансформатор, у которого сердечник совершенно закрыт и весь тепловой поток отдается с поверхности катушек, то здесь не должно быть и зависимости $\Delta\tau_к$ от ν. Соответствующая кривая также представлена на рис. 75.

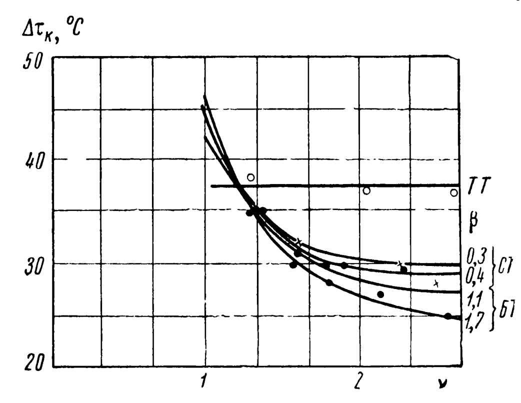


Рис. 75. Зависимость перегрева катушек от соотношения потерь при неизменных суммарных потерях ($p_с + p_к = \mathrm{const}$).

В силу указанных причин формулы (36) и (39) не могут при одинаковых значениях входящих в них коэффициентов использоваться с равным успехом для нормальной и повышенных частот. В (39), например, приходится вводить разные коэффициенты теплоотдачи α. Более того, при данной частоте α оказывается функцией соотношения потерь ν.

Для того чтобы полнее учесть тепловые процессы, необходимо ввести в рассмотрение раздельную теплоотдачу катушек и сердечника в окружающую среду и теплообмен между сердечником и катушками. Трем этим процессам соответствуют три идентичных уравнения теплоотдачи

$$p_x = \alpha_x \Delta\tau_x \Pi_x = \frac{\Delta\tau_x}{\dfrac{1}{\alpha_x \Pi_x}}.$$

Здесь p_x — мощность, проходящая через поверхность раздела двух данных сред;

$\Delta\tau_x$ — перепад температур между этими средами;

$П_x$ — величина поверхности раздела;
α_x — коэффициент теплоотдачи между двумя средами.

Индексу x будем давать значения: с — сердечник, к — катушки, кс — раздел сердечника и катушек. В написанном равенстве величина $\frac{1}{\alpha_x П_x} = R_x$ играет роль теплового сопротивления границы двух сред.

Если между сердечником и катушками существует теплообмен, определяемый потоком мощности между ними $\pm p_{кс}$, то поверхность охлаждения катушек отдает в среду потери $p_к \pm p_{кс}$, а поверхность охлаждения сердечника — $p_с \mp p_{кс}$.

Поэтому можно записать

$$p_к \pm p_{кс} = \frac{\Delta\tau_к}{R_к}; \quad p_с \mp p_{кс} = \frac{\Delta\tau_с}{R_с}; \quad p_{кс} = \frac{\Delta\tau_с - \Delta\tau_к}{R_{кс}}. \tag{41}$$

Разница перегревов сердечника и катушек $\Delta\tau_с - \Delta\tau_к$ и вызывает поток мощности $p_{кс}$. При $\Delta\tau_к = \Delta\tau_с$ $p_{кс} = 0$. Выражения (41) аналогичны закону Ома. Пользуясь этой аналогией, можно, как предложил Р. А. Лашевский, построить эквивалентную схему теплопередачи в т. м. м. (рис. 76). Источниками «питания» схемы являются потери $p_к$ и $p_с$. Решая совместно уравнения (41), исключая при этом $p_{кс}$, и возвращаясь к $\alpha_x П_x = \frac{1}{R_x}$, получим

$$\Delta\tau_к = \frac{p_к + p_с \frac{1}{1 + \frac{\alpha_с П_с}{\alpha_{кс} П_{кс}}}}{\alpha_к П_к + \frac{\alpha_с П_с}{1 + \frac{\alpha_с П_с}{\alpha_{кс} П_{кс}}}}. \tag{42}$$

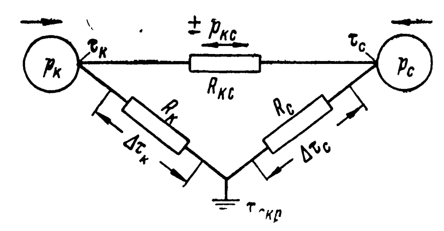


Рис. 76. Эквивалентная схема тепловых процессов в т. м. м.

Это выражение позволяет сделать важные выводы. Если сердечник и катушки полностью изолированы в тепловом отношении и $\alpha_{кс} = 0$, то

$$\Delta\tau_к = \frac{p_к}{\alpha_к П_к},$$

т. е. перегрев катушки определяется только потерями в ней и ее поверхностью охлаждения. Если тепловой контакт между сердечником и катушками идеален (тепловое сопротивление равно нулю) и $\alpha_{кс} = \infty$, то

$$\Delta\tau_к = \frac{p_к + p_с}{\alpha_к П_к + \alpha_с П_с}. \tag{43}$$

Поскольку коэффициент, стоящий перед потерями $p_с$ в числителе выражения (42), всегда меньше единицы (ибо реально

$\alpha_{кс}<\infty$), можно утверждать, что рост потерь в сердечнике не приводит к пропорциональному росту перегрева катушек, что и указывалось выше на основании опыта. Это справедливо только при условии $П_с \neq 0$.

Из формулы следует также, что чем больше величина $П_с$, тем меньшее значение в нагреве катушек имеют потери $p_с$. Наоборот, при малой величине $П_с$ их значение возрастает и в пределе, при $П_с=0$ (случай тороидального трансформатора), устанавливается пропорциональная зависимость между $\Delta\tau_к$ и $(p_к+p_с)$. Эти факты также приводились как экспериментально установленные.

Таким образом, формула (42) более правильно отражает сущность тепловых процессов в т. м. м. Она, однако, несколько громоздка. Кроме того, вызывает серьезные затруднения определение величины $\alpha_{кс}$, тем более что величина эта зависит и от неизвестного перепада температур между катушкой и сердечником. Поэтому для практических расчетов можно предложить более простую формулу, обладающую в то же время всеми теми достоинствами, что и формула (42). Она может быть получена на базе выражения (43), видоизмененного таким образом, чтобы отразить непропорциональность влияния $p_с$ на $\Delta\tau_к$ при условии $П_с \neq 0$. С этой целью на основании экспериментальных данных принято, что

$$\alpha_с=\alpha_к\sqrt{\nu}.$$

Тогда

$$\Delta\tau_к=\frac{p_к+p_с}{\alpha_к П_к+\alpha_к\sqrt{\nu}\,П_с}=\frac{p_к+p_с}{\alpha_к П_к\left(1+\frac{П_с}{П_к}\sqrt{\nu}\right)}. \tag{44}$$

Обозначив

$$\beta=\frac{П_с}{П_к}, \tag{45}$$

получим

$$\Delta\tau_к=\frac{p_к+p_с}{\alpha_к П_к(1+\beta\sqrt{\nu})}=\frac{p_к}{\alpha_к П_к}\cdot\frac{1+\nu}{1+\beta\sqrt{\nu}}. \tag{46}$$

В этих формулах

$p_к$ и $p_с$ — потери на фазу, *вт;*

$\nu=\frac{p_с}{p_к}$ — соотношение потерь в сердечнике и катушках по (40);

$П_с$ — поверхность охлаждения сердечника (его наружная открытая поверхность), *см²;*

$П_к$ — то же катушек, *см²* ($П_с$ и $П_к$ — на фазу).

Величина β по (45) отражает влияние на теплоотдачу геометрии трансформатора.

Формула (46) при изменениях ν в пределах имеющего место на практике диапазона значений этой величины дает хорошее совпадение с опытом. При этом ею можно пользоваться и при нормальной и при повышенных частотах, не вводя никаких корректировочных коэффициентов.

Рассмотрим теперь вопрос о коэффициентах теплоотдачи α, входящих в формулы для расчета перегрева.

Коэффициенты теплоотдачи. Поскольку теплоотдача обусловлена различными физическими процессами, коэффициенты α являются эквивалентными коэффициентами, учитывающими совместное действие конвекции, лучеиспускания и теплопроводности, т. е.

$$\alpha=\alpha_{\text{конв}}+\alpha_{\text{луч}}+\alpha_{\text{теплопр}}. \qquad (47)$$

Интенсивность конвекционного охлаждения зависит от вида теплоотводящего агента: она высока при охлаждении водой, а при охлаждении воздухом в несколько раз ниже, чем при охлаждении маслом. При использовании вместо воздуха элегаза или азота $\alpha_{\text{конв}}$ несколько повышается. В дальнейшем рассматривается только воздушное охлаждение. Для газов $\alpha_{\text{конв}}$ сильно зависит от давления D:

$$\alpha_{\text{конв}}\equiv\sqrt{D}. \qquad (48)$$

Величина $\alpha_{\text{конв}}$ зависит и от вида теплоизлучающего тела: так, для сердечника она несколько выше, чем для катушек. Значительное увеличение $\alpha_{\text{конв}}$ может быть получено путем искусственного перемешивания охлаждающей среды, например принудительным обдувом.

Зависит $\alpha_{\text{конв}}$ также от величины перегрева:

$$\alpha_{\text{конв}}\equiv\sqrt[4]{\Delta\tau}. \qquad (49)$$

Отсюда

$$\alpha_{\text{конв}}=\alpha^0_{\text{конв}}\sqrt[4]{\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0}}, \qquad (50)$$

где $\alpha^0_{\text{конв}}$ — соответствующий величине $\Delta\tau_0$ коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$\Delta\tau_0$ — некоторый базовый, фиксированный перегрев.

Охлаждение лучеиспусканием более интенсивно у шероховатых и темных поверхностей. Например, эффективно покрытие поверхности катушек непрозрачной эпоксидной эмалью ОЭП-4171. Кроме того, количество излученного тепла пропорционально по закону Стефана — Больцмана разности четвертых степеней абсолютных температур тела и охлаждающей среды. Разложение этой разности в ряд позволяет получить зависимость $\alpha_{\text{луч}}$

как от перегрева $\Delta\tau$, так и от температуры окружающей среды $\tau_{окр}$. Зависимость эта приближенно может быть выражена как

$$\alpha_{луч} \equiv \sqrt[4]{\Delta\tau}\,\sqrt[3]{\tau_{окр}}. \tag{51}$$

Отсюда, аналогично (50),

$$\alpha_{луч} = \alpha^0_{луч}\sqrt[4]{\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0}}\cdot\sqrt[3]{\frac{\tau_{окр}}{\tau_{окр_0}}}, \tag{52}$$

где $\tau_{окр_0}$ — некоторая базовая фиксированная температура окружающей среды;

$\alpha^0_{луч}$ — $\alpha_{луч}$, соответствующий величинам $\Delta\tau$ и $\tau_{окр_0}$.

Теплопроводность проявляет себя в охлаждении т. м. м. двояко. Благодаря теплопроводности сквозь толщу катушек осуществляется отвод тепла от их внутренних слоев к поверхности. Теплопроводность изоляционных материалов очень низка. Поэтому чем меньше изоляции, т. е. тоньше слой витковой изоляции, меньше число обмоток и ниже рабочее напряжение, тем лучше теплопроводность и выше $\alpha_{теплопр}$. Например, теплопроводность катушек из проводов с эмалевой изоляцией выше, чем для проводов с оплеткой. Теплопроводность улучшается также при качественной пропитке изоляции, исключающей в ней всякие воздушные включения. Особенно эффективна в этом отношении пропитка компаундами, например эпоксидными, КГМС. Эффективна заделка торцов катушек специальными пастами. С другой стороны, некоторое значение имеет теплопроводность от сердечника к металлическому шасси прибора, на котором укреплен трансформатор. Это особенно сказывается при больших потерях в сердечнике.

Если обратиться теперь к результирующему коэффициенту теплоотдачи α по (47) и сопоставить его составляющие, то оказывается, что главную роль играют $\alpha_{конв}$ и $\alpha_{луч}$, а

$$\alpha_{теплопр} \approx 0{,}2\alpha. \tag{53}$$

Поэтому, учитывая (49) и (51), можно записать с достаточной точностью, что при данной $\tau_{окр}$

$$\alpha \equiv \sqrt[4]{\Delta\tau} \tag{54}$$

и, аналогично (50) и (52),

$$\alpha = \alpha^0\sqrt[4]{\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0}}. \tag{55}$$

Из (54) следует, например, что с ростом перегрева $\Delta\tau$ в два раза величина α растет в $\sqrt[4]{2} = 1{,}2$ раза, т. е. на 20%.

Для оценки зависимости α от $\tau_{окр}$ учтем, что по экспериментальным данным при нормальных условиях в первом приближении

$$\alpha_{луч} \approx 0{,}6\ \alpha_{конв} \approx 0{,}3\ \alpha. \tag{56}$$

Тогда по (47) и (52)

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 0{,}7 + 0{,}3\sqrt[3]{\frac{\tau_{окр}}{\tau_{окр_0}}}. \tag{57}$$

Так, с ростом $\tau_{окр}$ от 25 до 100° величина α вырастает в

$$\left(0{,}7 + 0{,}3\sqrt[3]{\frac{100}{25}}\right) = 1{,}18 \text{ раза,}$$

т. е. на 18%.

Учитывая (47), (48) и (56), можно получить также следующую зависимость α от давления D, представляющую большой интерес при расчете трансформаторов авиационной аппаратуры, работающей на высоте в условиях сильного разрежения воздуха:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 0{,}5 + 0{,}5\sqrt{\frac{D}{D_0}}, \tag{58}$$

где D_0 — некоторое исходное фиксированное давление, *мм* рт. ст.;
α_0 — значение α при давлении D_0.

Например, снижение D с 760 до 20 *мм* рт. ст. приводит к снижению α в $\dfrac{1}{0{,}5 + 0{,}5\sqrt{\dfrac{20}{760}}} = 1{,}5$ раза.

Объединяя (47), (53), (55) — (58) и полагая для «нормальных» условий

$$\tau_{окр_0} = 25°,\ \Delta\tau_0 = 50°,\ D_0 = 760 \text{ мм рт. ст.,} \tag{59}$$

получим результирующую зависимость α от $\Delta\tau$, $\tau_{окр}$, D

$$\alpha = \alpha_0\sqrt[4]{\frac{\Delta\tau}{50}}\left(0{,}5\sqrt{\frac{D}{760}} + 0{,}3\sqrt[3]{\frac{\tau_{окр}}{25}} + 0{,}2\right), \tag{60}$$

где α_0 определен при условиях (59).

Охарактеризуем ориентировочно количественное влияние ряда других факторов на величину результирующего коэффициента теплоотдачи α.

Пропитка. Хорошая вакуумная пропитка обычными лаками увеличивает α на 5—10%, а компаундами и некоторыми лаками — на 10—25%:

$$\alpha_{проп.} = (1{,}05 - 1{,}25)\ \alpha_{непроп.} \tag{61}$$

Теплоотвод от сердечника на шасси. За счет этого фактора α (по сравнению со случаем отсутствия такого теплоотвода) увеличивается на 5—10% при частоте питания 50 *гц* и на 10—25% при повышенных частотах (бо́льшие цифры соответствуют трансформаторам малых размеров):

$$\alpha_{\text{шасси}} = (1{,}05 - 1{,}25)\,\alpha_{\text{без шасси}}. \tag{62}$$

Количество и вид изоляции. Наибольший α имеют т. м. м. с минимальным количеством изоляции, т. е. при малых напряжениях (до 500 *в*) и с малым числом обмоток (до 3—4). При большем числе обмоток и повышении напряжения до 1000—1500 *в* величина α понижается на 15—20%:

$$\alpha_{\text{много изол.}} = (0{,}9 - 0{,}8)\,\alpha_{\text{мало изол.}} \tag{63}$$

(имеются в виду сухие открытые трансформаторы).

У высоковольтных трансформаторов с заливкой катушек термореактивными компаундами α ниже, чем у низковольтных с малым количеством изоляции примерно на 10%:

$$\alpha_{\text{залит.}} = 0{,}9\alpha_{\text{мало изол.}} \tag{64}$$

Заметим, что в масляной среде, по сравнению с воздушной, α растет для катушек в 2,5—3 раза, а для сердечника — в 7—9 раз.

Искусственный обдув позволяет повысить α в два раза и более. При пониженном давлении, в высотных условиях, эффективность обдува сильно падает. Так, при $D=40$ *мм* рт. ст. рост α может составить лишь около 20%.

Диаметр провода катушек на величину α практически не влияет.

Исключительно важным для практики фактом является *зависимость α от размеров трансформатора.* Как известно, в теории теплопередачи путем сопоставления уравнений теплообмена Фурье и Ньютона выводится, что условия теплоотдачи геометрически подобных тел эквивалентны, если постоянен так называемый критерий Нуссельта $\frac{\alpha l}{\lambda}$, где λ — коэффициент теплопроводности (величина постоянная), l — линейный размер в направлении теплоотдачи. Отсюда следует, что с ростом размеров, т. е. мощности т. м. м., коэффициент α сильно падает. Обычно этот факт остается незамеченным и рекомендуются некоторые постоянные конкретные значения α, что является недопустимым. Опыт показывает, что с увеличением мощности от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольт-ампер α падает в несколько раз.

Отсюда следует, что при данной мощности α будет различным для т. м. м. разных частот — выше для повышенных, ниже для нормальной. Отсюда следует также, что при одинаковых мощностях α различен для различных типов т. м. м., поскольку у БТ,

СТ и ТТ при этом условии неодинаковы размеры в направлении теплоотдачи. Это различие α находится в пределах 10—20%, причем наибольший α имеет стержневой, наименьший — броневой трансформаторы.

Из всего сказанного в разделе «Коэффициенты теплоотдачи» следует, что конкретные величины α могут быть точно заданы только для вполне конкретных условий, на основе экспериментального определения в аналогичных условиях. Более того, величины α получаются различными, если их по результатам опыта подсчитать из различных формул — (36), (39), (46). Так, при пользовании выражением (39) величину α следует брать на 20—30% ниже, чем $\alpha_к$ при пользовании (46). Поэтому при определении α необходимо пользоваться теми формулами, которые приняты в практике расчетов $\Delta\tau_к$.

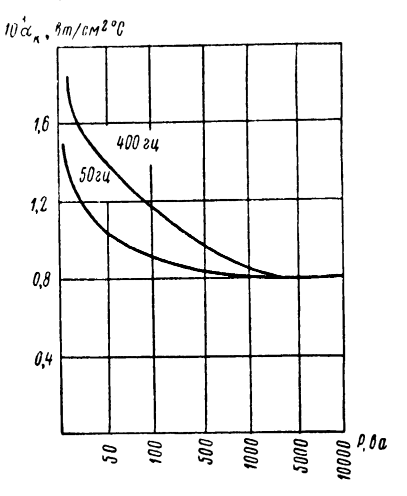


Рис. 77. Зависимость удельного коэффициента теплоотдачи от мощности т. м. м.

В зависимости от всех перечисленных выше условий величина α для т. м. м. лежит в широких пределах от 3×10^{-3} до $0{,}5 \times \times 10^{-3}$ *вт/см²*·°С.

Зависимость $\alpha_к$, используемого при расчетах по (46), от мощности т. м. м. при частотах 50 и 400 *гц* приведена на рис. 77. Кривые построены для следующих условий: $\tau_{окр} = 25°$, $\Delta\tau_к = 50°$, $D = 760$ *мм* рт. ст., трансформаторы открытого типа, стержневые, на разрезных ленточных сердечниках из холоднокатаной стали, напряжение — до 500 *в*, изоляция — бумажная с вакуумной пропиткой обычным лаком, число обмоток малое, покрытие обычными эмалями, без заделки торцов катушек, теплоотвод на шасси отсутствует, охлаждение естественное воздушное. При необходимости определения $\alpha_к$ для иных условий следует пользоваться зависимостями и соображениями, приведенными выше.

Меры улучшения теплоотдачи. Некоторые пути улучшения теплоотдачи ясны из вышеизложенного. Радикальным средством в этом направлении является внешний обдув трансформатора. Как показывает опыт, обдув весьма эффективен даже при небольших скоростях прохождения воздуха (0,5 *м/сек*), причем увеличение скорости свыше 4—5 *м/сек* не дает уже должного эффекта и не является целесообразным.

Значительное увеличение коэффициента теплоотдачи — в 1,5 раза и более — может быть получено одновременным примене-

нием пропитки катушек компаундами, покрытия их непрозрачными эмалями с высоким лучеиспусканием и заделки торцов теплопроводящими изоляционными пастами.

Значительное усиление интенсивности теплоотдачи (до 10—15%) достигнуто в галетных трансформаторах благодаря применению ребер охлаждения, помещенных между галетами и выступающих наружу (см. рис. 28). Эффект от подобных ребер охлаждения может быть намного увеличен, если их соединить с металлическим шасси.

Резкое улучшение условий теплоотдачи достигается применением принципиально новых способов охлаждения. Так, в Англии разработан т. м. м., охлаждаемый парами испаряемых жидких фторохимических соединений. Это позволило увеличить съем тепла в несколько раз.

Расчет потерь. Расчет потерь при вычислении перегрева производится обычным образом:

$$p_{\text{к}} = \sum_{1}^{N} p_{\text{к}i} = \sum_{1}^{N} I_i^2 r_i, \tag{65}$$

$$p_{\text{c}} = p_i G_{\text{c}} 10^{-3}. \tag{66}$$

Здесь $p_{\text{к}}$ и p_{c} — потери на фазу, *вт;*

N — число обмоток;

I_i — действующее значение тока i-ой обмотки, *а;*

r_i — активное сопротивление i-ой обмотки, *ом;*

p_i — удельные потери в сердечнике по (5) при интересующей нас индукции B, *вт/кг;*

G_{c} — вес сердечника на фазу, *г.*

Используя (2) и полагая для определенности $B_n = 10\,000$ *гс,* $p_i = p_{10}$, можем записать для p_{c}:

$$p_{\text{c}} = p_{10}\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 G_{\text{c}} \cdot 10^{-3} = p_{10}\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 \gamma_{\text{c}} \kappa_{\text{c}} V_{\text{c}} \cdot 10^{-3}, \tag{67}$$

где

γ_{c} — удельный вес материала сердечника, *г/см³;*

κ_{c} — коэффициент заполнения сердечника;

V_{c} — геометрический объем сердечника на фазу, *см³.*

При равных плотностях тока во всех обмотках или прибегая к среднеквадратичной плотности, можно пользоваться также выражением (17).

Потери $p_{\text{к}}$ и p_{c}, строго говоря, должны рассчитываться при горячем состоянии трансформатора, т. е. для температуры $\tau_{\text{окр}} + \Delta\tau_{\text{к}}$. Соответственно для этих условий нужно брать и коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$. Однако оказывается, что увеличение с ростом $\tau_{\text{окр}}$ и $\Delta\tau_{\text{к}}$ сопротивлений обмоток r_i (из-за роста ρ),

а следовательно, и потерь $p_к$ происходит практически в той же степени, что и увеличение при этом коэффициента $\alpha_к$, как в этом легко убедиться расчетом. Поэтому, беря в расчет $\alpha_к$ при $\tau_{окр_0} = 25°$ и $\Delta\tau_{к0} = 50°$, можно подсчитывать потери $p_к$ также для этих условий, т. е. для условного горячего состояния $\tau_{окр_0} + \Delta\tau_{к0} = 75°$.

Потери $p_с$ также можно брать при нормальной температуре, хотя с ростом температуры они несколько снижаются из-за уменьшения потерь на вихревые токи.

Все сказанное, как правило, справедливо и для самолетных т. м. м. Основным расчетным режимом здесь следует также считать режим при нормальном давлении, ибо с ростом высоты полета абсолютная температура катушек не возрастает, поскольку при этом резко падает температура окружающей среды, с избытком компенсируя рост перегрева из-за снижения α по (58). Если снижения $\tau_{окр}$ не будет, необходимо расчет перегрева вести с учетом высотности.

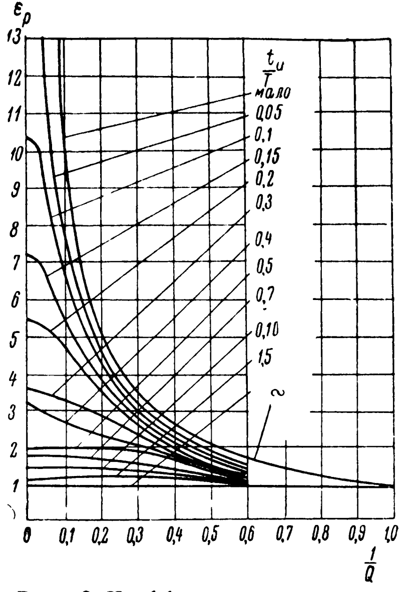


Рис. 78. **Коэффициент допустимого** увеличения потерь в повторно кратковременных режимах работы.

Нагрев т. м. м. при повторно-кратковременном режиме работы. При повторно-кратковременном режиме работы допустимые потери $p_к$ и $p_с$ могут быть увеличены по сравнению с продолжительным режимом при сохранении заданного перегрева $\Delta\tau_к$. Коэффициент увеличения потерь $\varepsilon_р$, как это можно показать, тем больше, чем меньше время работы (импульса) $t_и$ по отношению к тепловой постоянной трансформатора T и к полному времени цикла $t_ц$. Зависимость $\varepsilon_р$ от $\frac{t_и}{t_ц}$ и $\frac{t_и}{T}$, приводимая в курсах электропривода, воспроизведена на рис. 78. При очень малых $\frac{t_и}{T} \leqslant 0{,}01$—$0{,}02$ (в импульсном режиме) $\varepsilon_р = \frac{t_ц}{t_и}$, т. е. скважности Q. Ориентировочные значения T в зависимости от мощности приведены в табл. 21 для трансформаторов на ленточных сердечниках из холоднокатаной стали.

Увеличение $p_к$ и $p_с$ в $\varepsilon_р$ раз позволяет согласно (17) и (67) увеличить j и B в $\sqrt{\varepsilon_p}$ раз. Практически, однако, далеко не

Таблица 21

Значения тепловой постоянной нагрева трансформаторов T

Мощность, *ва*, при перегреве 50° и частоте											
	50 *гц*	до 1	5	10	20	50	100	200	500	1300	2000 и более
	400 *гц*	до 15	30	70	150	250	500	900	1500	3500	5000 и более
T, мин.		5	10	15	20	30	40	50	75	100	130

всегда удается это сделать, особенно при больших ε_p. Увеличению j может помешать заданное падение напряжения Δu, и увеличению B — недопустимый рост тока намагничивания. Чем выше частота и больше мощность, тем полнее могут быть использованы возможности увеличения j и B, что следует из выводов в § 14 и 15. При частоте 50 *гц* обычно приходится принимать B близкой к индукции насыщения, а увеличение j, если нет ограничений по Δu, может составить для малых трансформаторов примерно $\sqrt{\varepsilon_p}$ раз, а для больших — $\sqrt{2\varepsilon_p}$ раз.

§ 17. ОСОБЕННОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С РАБОТОЙ Т. М. М. В СХЕМАХ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Т. м. м. очень часто применяют для питания анодных цепей различных выпрямительных схем. Обмотки, работающие на выпрямитель, и трансформаторы, имеющие такие обмотки, называются анодными (анодные трансформаторы могут иметь в общем случае и обмотки другого назначения). При расчете анодных т. м. м. возникают некоторые особенности, которые следует кратко отметить.

Связь между выпрямленными и действующими токами и напряжениями. При расчете анодного трансформатора заданными являются выпрямленные токи и напряжения нагрузок I_{di} и U_{di}. Для проектирования же трансформатора необходимо знать номинальные действующие значения напряжения на его анодных обмотках U_i и действующие значения токов в обмотках I_i.

Напряжения U_{di} и U_i и токи I_{di} и I_i отличны друг от друга. Отношения $\frac{U_i}{U_{di}}$ и $\frac{I_i}{I_{di}}$ зависят от ряда факторов — схемы выпрямителя, типа фильтра на его выходе и др. Подробно эти вопросы рассматриваются в специальных курсах по выпрямительным схемам. Здесь же мы ограничимся приведением в табл. 22 ориентировочных значений $\frac{U_i}{U_{di}}$ и $\frac{I_i}{I_{di}}$ для наиболее распространенных схем выпрямления. В таблице указан

также коэффициент корректировки составляющей тока первичной обмотки по отношению к приведенному вторичному току

$$к_в = \frac{I_1}{I}. \tag{68}$$

Таблица 22

Ориентировочные соотношения токов и напряжений для выпрямительных схем

	Вид схемы	$к_в = \frac{I_1}{I}$	При емкостном фильтре		При индуктивном фильтре	
			$\frac{U_i}{U_{di}}$	$\frac{I_i}{I_{di}}$	$\frac{U_i}{U_{di}}$	$\frac{I_i}{I_{di}}$
Однофазные	Однополупериодная	$\sqrt{1-\left(\frac{I_{di}}{I_i}\right)^2}$	~1,4	1,9—2,5	—	—
	Удвоения	1	~0,7	2,7—3,5	—	—
	Двухполупериодная* со средней точкой	$\frac{1}{1,41}$	~1,1	1—1,3	1,11	0,71
	Мостовая	1	~1,1	1,4—1,8	1,11	1
Трехфазные	С нулевой точкой	0,81	~1	0,6—0,8	0,855	0,58
	Мостовая Ларионова	1	~0,6	0,6—0,8	0,43	0,82

* В расчет вводится половина витков всей вторичной обмотки и соответствующее напряжение.

При точном вычислении $\frac{U_i}{U_{di}}$ и $\frac{I_i}{I_{di}}$ по кривым, приводимым в соответствующей литературе, можно считать, что индуктивность рассеяния в цепи отсутствует, поскольку у т. м. м. величина $x_к$ весьма мала (см. § 14).

Специфичный случай работы трансформатора на выпрямитель, заряжающий емкостный накопитель энергии, будет проанализирован отдельно в гл. VI.

Первичный ток т. м. м., имеющих анодные обмотки. Если пренебречь намагничивающим током и понимать под I_i' приведенный действующий ток, соответствующий i-ой обмотке, то для

т. м. м., имеющего в числе вторичных анодные обмотки, можно пользоваться для подсчета первичного тока равенством

$$I_1 = \sum_{i=2}^{N} к_{вi} I'_i, \tag{69}$$

где $к_в$ — по табл. 22;

i — номер обмотки.

Соответственно мощность первичной обмотки

$$P_1 = \frac{1}{\eta} \sum_{i=2}^{N} к_{вi} P_i, \tag{70}$$

где η — к. п. д.; мощность i-ой обмотки

$$P_i = mU_i I_i.$$

Для обмоток, не связанных с выпрямителем, $к_{вi} = 1$.

При подсчете намагничивающего тока $I_{0\mu}$ для трансформатора, питающего однополупериодную схему, следует помнить о наличии постоянной составляющей потока в сердечнике, вызванной током I_d. Это приводит к резкому увеличению тока $I_{0\mu}$, рассчитываемому в этом случае по кривым одновременного намагничивания сердечника переменным и постоянным полями.

О явлении вынужденного намагничивания в т. м. м. Как известно, в трансформаторе, который работает на выпрямитель и обмотки которого расположены не на одном стержне, в ряде схем может возникать явление вынужденного намагничивания стержней сердечника. Это явление заключается в появлении вдоль стержней намагничивающей силы (обычно постоянной), скомпенсированной по всему замкнутому контуру магнитопровода, но не скомпенсированной в пределах каждого стержня. Такая н. с. $F_=$ возникает, например, в стержнях однофазного стержневого трансформатора, работающего в двухполупериодной схеме выпрямления с нулевой точкой (рис. 79). Магнитный поток $\Phi_=$, возникающий под действием этой н. с., не может замкнуться вдоль магнитопровода и замыкается вокруг стержней по воздуху или по соседним металлическим предметам. Если поток вынужденного намагничивания достигает заметной величины, он проявляет себя так же, как постоянная составляющая потока в сердечнике.

Однако, как показывают расчеты и эксперимент, ввиду относительной малости н. с. обмоток явление вынужденного намагничивания в т. м. м. практически не сказывается на работе трансформатора. Оно поэтому может не учитываться. Это справедливо даже в тех случаях, когда ярма сердечника замыкаются внешним стальным стержнем, т. е. условия для прохождения вынужденного потока становятся максимально благоприятными.

Расположение обмоток стержневого трансформатора при работе на двухполупериодную схему выпрямления со средней точкой. В этом случае для получения минимального рассеяния между обмотками каждое плечо вторичной обмотки, работающей на двухполупериодный выпрямитель, можно разбить на две секции, симметрично расположенные на обоих стержнях. Это, однако, усложняет конструкцию трансформатора.

Практически достаточно каждое плечо вторичной обмотки расположить на своем стержне, а две части первичной обмотки, находящиеся на разных стержнях (см. § 4), соединить между собой параллельно. При последовательном соединении ухудшается электромагнитная связь между первичной обмоткой в целом и плечом вторичной обмотки, проводящим ток в данный полупериод. При равных токах нагрузки напряжение при этом оказывается уменьшенным на 0,3—2% по сравнению со случаем параллельного соединения частей первичной обмотки.

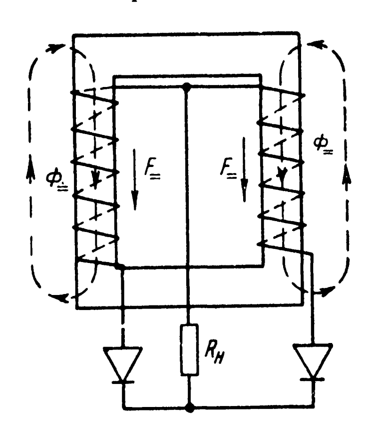


Рис. 79. К явлению вынужденного намагничивания.

Тот же эффект, но в несколько меньшей степени, имеет место, если несимметрично расположить среднюю точку вторичной обмотки, т. е. разместить эту обмотку на стержнях неравными частями. Уменьшение **напряжения** может составить здесь 0,3—1%.

§ 18. ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ Т. М. М.

Основными технико-экономическими показателями т. м. м. являются вес G, объем V и стоимость (цена) Ц. Первые два показателя становятся решающими для военной и транспортной аппаратуры. Стоимость также играет важную роль, а для трансформаторов бытовой радио- и электротехнической аппаратуры становится важнейшим показателем.

Универсальными характеристиками экономичности являются удельные экономические показатели — удельный вес g, удельный объем v, удельная стоимость (цена) «ц». Это есть вес, объем и стоимость, приходящиеся на единицу мощности трансформатора, т. е.

$$g=\frac{G}{P}, \quad v=\frac{V}{P}, \quad ц=\frac{Ц}{P}. \tag{71}$$

Объединяя вес, объем и стоимость в общее понятие экономического показателя Э, получим обобщенный удельный экономический показатель

$$э = \frac{Э}{P}. \qquad (72)$$

В зависимости от поставленной задачи под Э можно понимать либо G, либо V, либо Ц. Соответственно под «э» — либо g, либо v, либо «ц».

Часто для характеристики экономичности прибегают также к обратным величинам — удельным мощностям, т. е. мощностям, приходящимся на единицу веса или объема. Однако мы воспользуемся первым способом.

Задачей проектировщика является спроектировать трансформатор так, чтобы его вес, объем или стоимость, в зависимости от поставленных требований, были минимальны. Такой трансформатор можно считать оптимальным.

В последние годы ведется непрерывная борьба за улучшение удельных экономических показателей т. м. м. Приводим данные, характеризующие снижение удельного веса лучших отечественных т. м. м. средней мощности при частоте 400 *гц* и перегреве 50°:

Годы	1945—1948	1952	1958	1960
g, *г/ва*	10	5—6	3,3—5	2,5—3,3

Стоит задача дальнейшего всемерного снижения веса, объема и стоимости т. м. м. При этом, например, для т. м. м. авиационной аппаратуры имеет значение снижение веса и объема всего на несколько процентов. То же относится в части стоимости к т. м. м. аппаратуры народного потребления. Надо сказать, что каждый процент снижения веса, объема и стоимости трансформаторов достигается весьма нелегко, ибо за годы их совершенствования многие из возможностей в этом отношении полностью исчерпаны.

Определим те факторы, которые влияют на экономические показатели трансформатора, и степень их влияния в количественном отношении. Анализируя полученные зависимости, можно будет определить и те условия, которые обеспечивают проектирование оптимального трансформатора. Для решения вопроса в общем виде проведем дальнейший анализ относительно величины удельного экономического показателя «э» по (72).

Заметим, что на практике под мощностью P в (71) и (72) понимается полезная, вторичная мощность трансформатора P_{II} (исключая анодные трансформаторы с $к_{вi} \neq 1$). Мы же в общем анализе будем понимать под нею электромагнитную мощ-

ность. Это позволит облегчить теоретическое рассмотрение вопроса без сколь-нибудь существенной ошибки, так как с достаточной точностью $P \approx P_{\text{II}}$.

Величины Э определяются геометрическими размерами трансформатора и некоторыми постоянными коэффициентами. В дальнейшем рассмотрении мы будем под G понимать вес активных материалов, а под V — объем описанного параллелепипеда без учета конструктивных элементов. Разумеется, что во всех случаях важную роль играет экономичное конструктивное оформление трансформатора, которое не должно существенно увеличивать его вес и объем.

Мощность P по (11) при заданных значениях коэффициентов заполнения κ_c и $\kappa_{\text{ок}}$ зависит как от геометрических размеров s_c и $s_{\text{ок}}$, так и от индукции B и плотности тока j. В § 15 было показано, что выбор величин B и j производится по-разному в зависимости от поставленных требований. Нашей задачей и будет определение для этих различных случаев математических выражений для B и j и решение их совместно с (11) и (72). Начнем с наиболее многочисленной группы т. м. м. — проектируемых на заданный перегрев.

Трансформаторы, проектируемые на заданный перегрев. Как уже указывалось выше, здесь в свою очередь следует различать два случая — когда и j и B выбираются из условий нагрева и когда j выбирается из условий нагрева, а B — из условий намагничивания Первый случай был отнесен, с известной долей условности, к трансформаторам повышенных частот, второй, с той же оговоркой, к трансформаторам нормальной частоты. Рассмотрим эти случаи последовательно.

Трансформаторы повышенной частоты. Допустимые величины индукции и плотности тока в (11) могут быть найдены из выражений (17) и (67) для потерь $p_{\text{к}}$ и p_c.

Используя соотношение (40), получим

$$p_c = \nu p_{\text{к}}. \tag{73}$$

Подставляя (73) в (67), можно индукцию B выразить через потери в катушках и соотношение потерь ν. В свою очередь, потери $p_{\text{к}}$ (на фазу) выражаются из уравнения теплового равновесия (46)

$$p_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \Delta\tau_{\text{к}} \Pi_{\text{к}} \frac{1 + \beta\sqrt{\nu}}{1 + \nu} \tag{74}$$

В соответствии с замечаниями в разделе «Расчет потерь» § 16 $\alpha_{\text{к}}$ будем считать постоянным.

Находя j из (17) и (74) и B из (67), (73), (74), получим

$$j = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{к}} \Delta\tau_{\text{к}} \Pi_{\text{к}}}{\rho \kappa_{\text{ок}} V_{\text{к}}} \frac{1 + \beta\sqrt{\nu}}{1 + \nu}}; \tag{75}$$

$$B = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{к}} \Delta\tau_{\text{к}} \Pi_{\text{к}} 10^{11}}{\gamma_c \kappa_c V_c p_{10}} \nu \frac{1 + \beta\sqrt{\nu}}{1 + \nu}}. \tag{76}$$

Подставим теперь (75) и (76) в (11). При этом учтем, что для рассматриваемого случая мы можем пренебречь током намагничивания ввиду его малости (см. § 14). Поэтому при одинаковых плотностях тока в первичной и вторичных обмотках окно между ними делится поровну и коэффициент n в (11) равен 2.

Тогда

$$P = \frac{2{,}22}{\sqrt{10}} m \alpha_{к} \Delta\tau_{к} f \sqrt{\frac{к_{ок} к_{с}}{\rho\gamma_{с}} \frac{1}{p_{10}} \frac{s_{с} s_{ок} П_{к}}{\sqrt{V_{к} V_{с}}}} \left[\sqrt{\nu} \frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}\right]. \qquad (77)$$

Проанализируем полученное выражение. Если перед нами реальный трансформатор с определенными конструктивными данными ($к_{ок}$, $к_{с}$, $s_{с}$, $s_{ок}$, $П_{к}$, β, $V_{к}$, $V_{с}$ — заданы), то при постоянной частоте его мощность зависит от реализуемого перегрева $\Delta\tau_{к}$, коэффициента теплоотдачи $\alpha_{к}$, качества сердечника и его материала — величины удельных потерь p_{10}. Кроме того, при данных $\Delta\tau_{к}$, $\alpha_{к}$, p_{10} мощность зависит от выбранного режима работы с точки зрения соотношения потерь в сердечнике и катушках ν. Эта зависимость определяется безразмерным выражением, заключенным в квадратные скобки, которое обозначим φ_{ν},

$$\varphi_{\nu} = \sqrt{\nu} \frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}. \qquad (78)$$

Максимальная мощность соответствует максимуму выражения φ_{ν}. Максимум этот достигается при некотором соотношении потерь $\nu = \nu_0$, являющимся оптимальным. Выбор оптимального режима работы обосновывается в § 19.

Рассмотрев формулу (77) для некоторого данного, готового трансформатора, предположим теперь, что мы сравниваем различные трансформаторы или проектируем новый трансформатор. От каких факторов, помимо рассмотренных выше, зависит мощность трансформатора?

Как следует из (77), при прочих равных условиях мощность, могущая быть реализована в трансформаторе, пропорциональна выражению $\frac{m s_{с} s_{ок} П_{к}}{\sqrt{V_{к} V_{с}}}$. Легко видеть, что эта величина, в свою очередь, пропорциональна кубу линейных размеров, т. е. объему трансформатора. Отсюда следует тот важный вывод, что для трансформаторов повышенной частоты не имеет места так называемый «закон роста», принимаемый обычно в электромашиностроении, согласно которому мощность электрических машин и трансформаторов растет быстрее, нежели их вес и габариты Таким образом, удельный экономический показатель «э» не зависит от абсолютных размеров, т. е. мощности, при работе трансформатора на повышенных частотах,

Запишем выражение для удельного показателя «э» по (72) и (77), одновременно подставив φ_ν по (78) и обозначая φ_ν при $\nu=1$ через $\varphi_{\nu=1}$,

$$э=\frac{2\sqrt{2}}{\alpha_к \Delta\tau_к f}\sqrt{\frac{\rho\gamma_c}{к_c к_{ок}}p_{10}}\,\frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}\,\frac{Э\sqrt{V_к V_c}}{m s_c s_{ок}П_к(1+\beta)}. \qquad (79)$$

Обозначим

$$\frac{Э\sqrt{V_к V_c}}{m s_c s_{ок}П_к(1+\beta)}=к_э. \qquad (80)$$

Поскольку Э пропорционален кубу линейных размеров, коэффициент $к_э$ является безразмерным коэффициентом. Он определяется, как видим, числом фаз и соотношениями различных геометрических параметров трансформатора, или, как говорят, его геометрией.

Окончательно для «э» можно записать

$$э=\frac{2\sqrt{2}}{\alpha_к \Delta\tau_к f}\sqrt{\frac{\rho\gamma_c}{к_c к_{ок}}p_{10}}\,\frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}\,к_э, \qquad (81)$$

где $к_э$ — по (80), φ_ν — по (78).

Из (81) видно, что «э» зависит от коэффициента $к_э$, который может быть назван коэффициентом геометрии Минимальная величина «э» может быть обеспечена (при прочих равных условиях) при минимальном коэффициенте $к_э$. Найти условия минимума $к_э$ — значит найти оптимальную геометрию трансформатора. Если нас интересует минимальный объем, то в (80) $Э = V$ и $к_э = к_v$. Если ищем минимум веса, то $Э = G$ и $к_э = к_g$. Условия оптимальной геометрии будут рассмотрены ниже. Заметим, что $к_э$ будет различным для различных типов однофазных трансформаторов.

Итак, удельные экономические показатели трансформатора зависят от: допустимого перегрева ($\Delta\tau_к$); эффективности теплоотдачи ($\alpha_к$); качества сердечника, именно величины удельных потерь в стали (p_{10}); выбранного режима работы (φ_ν); числа фаз и геометрии трансформатора ($к_э$); частоты (f); коэффициентов заполнения ($к_c$ и $к_{ок}$); удельного сопротивления материала проводника (ρ). Влияние всех этих факторов будет рассмотрено в следующем параграфе. Зависимость от γ_c можно не рассматривать, поскольку практически эта величина одинакова для различных материалов сердечника.

Трансформаторы нормальной частоты 50 *гц*. Как отмечалось ранее, основной особенностью т. м м. нормальной частоты является значительная величина тока намагничивания, который не может быть поэтому исключен из рассмотрения. С другой стороны, здесь несравненно меньшую роль играют

потери в сердечнике. Их величина оказывается значительно меньше, чем величина потерь в катушках. Поэтому в общем анализе ими можно пренебрегать, полагая

$$\nu = \frac{p_{c}}{p_{к}} \approx 0. \tag{82}$$

Первичный ток

$$I_1 = \sqrt{I^2 + I_0^2} = I\sqrt{1 + i_0^2}, \tag{83}$$

где i_0 — по (12), а $I_0 \approx I_{0\mu}$.

Поскольку первичный ток в $\sqrt{1 + i_0^2}$ раз больше приведенного вторичного тока I, на первичную обмотку при одинаковых плотностях тока приходится отводить в $\sqrt{1 + i_0^2}$ раз бо̀льшую часть окна, чем на вторичные. Поэтому в (11)

$$n = 1 + \sqrt{1 + i_0^2}. \tag{84}$$

Плотность тока j в (11) по-прежнему определяется равенством (75), но с учетом (82). При этом в поверхность охлаждения катушки следует включить и те участки, которые закрыты магнитопроводом, почему заменим $П_к$ через $П'_к$

Сложнее обстоит дело с индукцией B. Обратимся к намагничивающей мощности $P'_0 \approx P_{\mu}$. Она может быть разбита на две части — мощность P_{Fe}, необходимую для проведения магнитного потока вдоль сердечника со средней длиной магнитной линии l_c, и мощность P_{δ}, расходуемую на проведение потока через зазор 2δ.

Очевидно,

$$P_0 = P_{Fe} + P_{\delta} = m\left(\frac{H_{\sim} l_c}{w} E + 2\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{0{,}8\kappa_c B\delta}{w} E\right), \tag{85}$$

где $H_{\sim}$ — напряженность магнитного поля в сердечнике в действующих значениях при индукции B, *а/см*;
E — по (9).

Кривые $H_{\sim}(B)$ воспроизведены на рис. 80.

Современные высокоиспользованные трансформаторы работают при весьма высоких индукциях. Эти индукции лежат на линейных участках кривых намагничивания за коленом. На рис. 80 рабочие участки кривых проведены жирными линиями. Их можно выразить линейной функцией

$$H_{\sim} = \frac{B - B_0}{\kappa_{Fe}}, \tag{86}$$

где B_0 — индукция, отсекаемая на оси ординат продолжением линейного участка кривой намагничивания;

κ_{Fe} — коэффициент пропорциональности для линейного участка.

Для холоднокатаных сталей $B_0 \approx 15\,500$ *гс*, сталей Э41 — Э43 — 10 500 *гс*. В обоих случаях

$$\kappa_{Fe} \approx 300 \text{ гс/а/см}. \qquad (87)$$

Подставляя в (85) E по (9), $H_{\sim}$ — по (86) и выражая P_0 через P по (12), получим

$$P = \frac{4{,}44 f \kappa_c s_c l_c m 10^{-8}}{i_0 \kappa_{Fe}} B\left[\left(1 + 1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c \frac{\delta}{l_c}\right) B - B_0\right]. \qquad (88)$$

Таким образом, нам удалось получить систему двух уравнений (11) и (88), которая может быть решена относительно P и B. Подставляя в (88) B из (11) с учетом (75), (82) и (84), имеем:

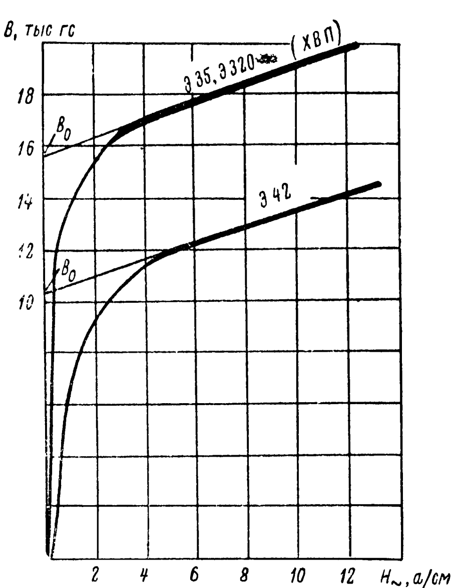


Рис. 80 Кривые намагничивания холоднокатаной и горячекатаной стали на переменном токе.

$$P = \frac{4{,}44 m f 10^{-6}}{1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c \frac{\delta}{l_c} + 1}\left[\frac{\kappa_{Fe}\kappa_c\kappa_{ок}\alpha_к\Delta\tau_к}{\rho} \frac{100 i_0}{\left(1 + \sqrt{1 + i_0^2}\right)^2} \frac{s_c s_{ок}^2 \Pi'_к}{l_c V_к} + \frac{\kappa_c s_{ок} s_c B_0}{1 + \sqrt{1 + i_0^2}} \sqrt{\frac{\alpha_к \kappa_{ок} \Delta\tau_к}{\rho} \frac{\Pi'_к}{V_к}}\right]. \qquad (89)$$

Из (89) видно, что мощность, которая может быть получена от данного трансформатора при постоянном перегреве, зависит при прочих равных данных от выбранного режима намагничивания — величины i_0. Понятно, что ток i_0, в свою очередь, зависит от выбранной индукции. Определение оптимальных i_0 и B произведено в § 19.

Рассмотрим другие факторы, влияющие на мощность трансформатора. Из (89) видно, что мощность тем больше, чем меньше зазор в сердечнике δ. Физически это объясняется тем, что

с уменьшением δ может быть реализована бо́льшая индукция B при том же i_0 [см. ниже формулу (146)]. Когда мы рассматриваем штампованные сердечники, собранные вперекрышку, δ есть некоторый эквивалентный зазор, учитывающий увеличение намагничивающей силы за счет удвоения индукции в местах перекрытия пластин.

Расчетная величина δ в этом случае зависит от выбранной индукции и при данной индукции является относительно стабильной. В случае разъемных ленточных сердечников δ — это реальный зазор между половинками сердечника, неизбежно остающийся после сборки магнитопровода. При плохом качестве полусердечников и их сборки величина δ может оказаться значительной и при том же i_0 мощность P окажется сильно заниженной.

Если, однако, изготовление и сборка магнитопровода выполнены качественно, то влияние величины δ на режим работы трансформатора сказывается очень мало (напоминаем, что рассматривается случай больших значений индукции). Возьмем неблагоприятный, согласно (89), вариант достаточно малого трансформатора: $l_c = 5\,см$. Принимая (см. § 11) $\delta = 20 \times 10^{-4}\,см$, $\kappa_c = 0{,}9$, получим $1{,}14\ \kappa_c \kappa_{F_e} \frac{\delta}{l_c} = 1{,}14 \times 0{,}9 \times 300 \times \frac{20 \times 10^{-4}}{5} =$ $= 0{,}12$, т. е. значительно меньше единицы. С ростом же размеров т. м. м. эта величина уменьшается до нескольких процентов, т. е. она совершенно несущественна. Поэтому в (89) ею можно практически пренебречь.

Для дальнейшего анализа выражения (89) примем во внимание также, что во всех практически возможных случаях первый член в квадратных скобках значительно меньше второго. Опуская его, получим

$$P = \kappa_1 m f \kappa_c B_0 \sqrt{\frac{\alpha_\kappa \Delta\tau_\kappa \kappa_{o\kappa}}{\rho}\, s_c s_{o\kappa}} \sqrt{\frac{\Pi'_\kappa}{V_\kappa}}, \tag{90}$$

где κ_1 — постоянный коэффициент (при данном i_0):

$$\kappa_1 = \frac{4{,}44 \times 10^{-6}}{1 + \sqrt{1 + i_0^2}} = \frac{4{,}44 \times 10^{-6}}{n}. \tag{91}$$

Переходя к удельному экономическому показателю, находим

$$э = \frac{Э}{P} = \frac{1}{\kappa_1 f \kappa_c B_0} \sqrt{\frac{\rho}{\alpha_\kappa \Delta\tau_\kappa \kappa_{o\kappa}}}\, \kappa'_э, \tag{92}$$

где

$$\kappa'_э = \frac{Э}{m s_c s_{o\kappa}} \sqrt{\frac{V_\kappa}{\Pi'_\kappa}}. \tag{93}$$

Рассматривая член $к_э'$, видим, что он уменьшается с ростом размеров трансформатора. Значит, с ростом размеров (мощности) уменьшается и «э». Иначе говоря, для т. м. м. нормальной частоты сохраняет силу «закон роста», более мощные трансформаторы будут обладать лучшими экономическими показателями, чем трансформаторы меньших мощностей.

Наличие члена $к_э'$ говорит также о зависимости «э» от числа фаз и геометрии трансформатора. Чтобы получить четкую зависимость «э» от мощности, необходимо преобразовать выражение для «э», исключив из него линейный размер l, скрытый в (93), и воспользовавшись соотношением $Э \equiv l^3$. Подобное преобразование приводит к выражению

$$э = \frac{Э}{P} = \frac{1}{\sqrt[7]{P}} \sqrt[7]{\left[\frac{1}{к_1 f к_с B_0} \sqrt{\frac{\rho}{к_{ок} \alpha_к \Delta\tau_к}}\right]^6} к_э. \qquad (94)$$

Таким образом, с ростом мощности «э» уменьшается обратно пропорционально корню седьмой степени из ее величины.

В (94) $к_э$ зависит уже исключительно от геометрии и не зависит от абсолютных размеров трансформатора. Его значение и условия оптимальной геометрии рассмотрены ниже, в § 20. Роль других величин, входящих в (94), анализируется в § 19.

В заключение напомним, что все сделанные выводы строго справедливы для условия (82). В т. м. м. мощностью выше нескольких сот вольт-ампер это условие уже не соблюдается (см. § 15). Если имеет место соотношение $\frac{p_c}{p_к} > 1$, то справедливы выводы, полученные для т. м. м. повышенной частоты. В других случаях рассмотренные зависимости будут носить промежуточный характер.

Трансформаторы, проектируемые на заданное падение напряжения. В данном случае величина j в (11) определяется заданной величиной падения напряжения Δu. Найдем эту зависимость. В § 14 было показано, что для т. м. м. в большинстве случаев $\Delta u = u_{ка}$ и по (16)

$$\Delta u = \frac{m p_к}{P}. \qquad (95)$$

Выражая $p_к$ по (17), находим

$$j = \sqrt{\frac{P \Delta u}{m к_{ок} \rho V_к}}. \qquad (96)$$

Решая (96) совместно с (11) и (84) и полагая, что $i_0 = 0$, ибо намагничивающий ток не влияет на Δu (см. § 14) и окно

можно делить между обмотками поровну вне зависимости от величины i_0, получим

$$n=2 \quad \text{и} \quad j=2{,}22\frac{f\kappa_c B}{\rho}\Delta u\frac{s_c s_{ок}}{V_к}10^{-6}. \qquad (97)$$

Подставляя (97) в (11), находим при том же условии

$$P=(2{,}22f\kappa_c s_c s_{ок} B 10^{-6})^2 m\frac{\kappa_{ок}\Delta u}{\rho V_к}. \qquad (98)$$

Переходя к удельному экономическому показателю, можно получить, используя те же равенства,

$$э=\frac{Э}{P}=\frac{\rho}{(2{,}22f\kappa_c B\ 10^{-6})^2\kappa_{ок}\Delta u}\kappa'_э, \qquad (99)$$

где

$$\kappa'_э=\frac{ЭV_к}{ms_c^2 s_{ок}^2}. \qquad (100)$$

Коэффициент $\kappa'_э$ отражает влияние на величину «э» числа фаз и геометрии трансформатора.

Чтобы зависимость «э» от мощности получить в явном виде, исключим из (99) линейный размер l, содержащийся в (100). Тогда получим, используя соотношение $Э\equiv l^3$,

$$э=\frac{Э}{P}=\frac{1}{\sqrt[5]{P^2}}\sqrt[5]{\frac{\rho^3}{\kappa_c^6\kappa_{ок}^3 f^6 B^6\Delta u^3(2{,}22\times10^{-6})^6}}\kappa_э. \qquad (101)$$

Теперь $\kappa_э$ зависит только от геометрических соотношений (включая число фаз) и не зависит от абсолютных размеров трансформатора. Выражение для $\kappa_э$ будет приведено далее при анализе оптимальной геометрии (см. § 20).

Из (101) следует, что при постоянном Δu экономические показатели трансформатора улучшаются примерно обратно пропорционально корню квадратному из мощности. Таким образом, здесь также имеет место «закон роста». Величина «э» тем меньше, чем больше допустимое падение напряжения Δu, причем зависимость эта выражается примерно корнем квадратным из величины Δu. Существует также почти обратно пропорциональная зависимость «э» от индукции B. Выбор индукции определяется либо условиями нагрева (допустимыми потерями в сердечнике), либо, чаще, допустимым током намагничивания.

Заметим, что если при выводе выражения (16) вместо $U_1=E$ принять более точно

$$U_1=E+\frac{\Delta u}{2},$$

то (95) предстанет в виде

$$\Delta u = \frac{mp_к}{P + \frac{mp_к}{2}},$$

а в (96) — (99) и (101) вместо члена Δu окажется член $\frac{\Delta u}{1 - \frac{\Delta u}{2}}$.

Трансформаторы, рассчитываемые на заданный ток намагничивания. Как правило, это случай весьма малых трансформаторов (однофазных). Ограничимся рассмотрением трансформаторов с ленточными разъемными сердечниками.

Поскольку при малых мощностях для получения приемлемых значений i_0 величину B приходится ограничивать (см. § 14, 15), будем считать, что величина B лежит на кривой намагничивания ниже ее колена. В этом случае оказывается, что н. с., приходящаяся на зазор, значительно больше, чем н. с. на магнитный сердечник. Рассматривая уравнения (11), (12) и (85), можно получить, пренебрегая величиной $H_{\sim} l_c$ и полагая, что $m = 1$,

$$P = \frac{4f10^{-4}}{n^2} к_{ок}^2 j^2 s_c s_{ок}^2 \frac{i_0}{\delta}. \qquad (102)$$

Из этого выражения следует, что с данного трансформатора можно снять тем большую мощность, чем меньше зазор δ и чем больше допустимая величина i_0.

Индукция, соответствующая току i_0, может быть определена из выражения

$$B = 0{,}9 \frac{i_0}{n} \frac{1}{\delta} \frac{j к_{ок} s_{ок}}{к_c} 10^2. \qquad (103)$$

Для удельных экономических показателей имеем из (102), с учетом связи $Э \equiv l^3$,

$$э = \frac{Э}{P} = \frac{n^2}{i_0} \frac{1}{4f10^{-4}} \frac{\delta}{к_{ок}^2 j^2} к_э' = \frac{1}{\sqrt{P}} \sqrt{\frac{n^2}{i_0} \frac{10^4}{4f} \frac{\delta}{к_{ок}^2 j^2}}\, к_э, \qquad (104)$$

где $к_э$ будет раскрыт ниже, в § 20, а

$$к_э' = \frac{Э}{s_c s_{ок}^2}. \qquad (105)$$

При прочих равных данных «э» зависит исключительно от $к_э'$. Легко видеть, что в данном случае это коэффициент, целиком зависящий от относительной геометрии трансформатора.

Если величина j не ограничивается условиями нагрева, то окно сердечника может быть всегда разделено между обмотками пополам и в (102), (103) и (104) $n = 2$.

§ 19. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ Т. М. М. И ПУТИ ИХ УЛУЧШЕНИЯ

В предыдущем параграфе были выявлены основные факторы, влияющие на экономические показатели т. м. м. Теперь мы рассмотрим влияние всех этих факторов.

Режим работы трансформатора. Как было показано, важную роль играет правильное распределение электромагнитных нагрузок между магнитопроводом и катушками.

Т. м. м. повышенных частот. Наивыгоднейший режим работы соответствует такому распределению потерь между сердечником и катушками, т. е. такому выбору величины $\nu = \nu_0$ (и соответствено такому выбору величин B и j), при котором величина φ_ν по (78) максимальна. Анализируя φ_ν на максимум, т. е. решая $\frac{\partial \varphi_\nu}{\partial \nu} = 0$, получим, что величина ν_0 зависит от параметра β, определяющего соотношение поверхностей охлаждения сердечника и катушек по (45). Интересно отметить, что лишь при $\beta = 0$ (отсутствие открытых поверхностей охлаждения сердечника) режим максимальной мощности совпадает с режимом максимального к. п. д., так как при $\beta = 0$ $\nu_0 = 1$ и $p_с = p_к$. Этот случай имеет место для тороидального трансформатора. Для броневого же и стержневого трансформаторов $\beta > 0$ и $\nu_0 > 1$. Таким образом, при желании получить от трансформатора максимальную мощность, необходимо так выбрать индукцию и плотность тока, чтобы обеспечить $p_с > p_к$ для БТ, СТ и ЗТ и $p_с = p_к$ для ТТ.

Степень неравенства $p_с > p_к$ оказывается тем большей, чем больше β. В то же время анализ показывает, что максимум члена φ_ν весьма пологий, т. е. в зоне $\nu \approx \nu_0$ величину ν можно варьировать в известных пределах, не боясь заметного проигрыша в мощности. На рис. 81 дана зависимость φ_ν от ν в оптимальной зоне.

Оптимальные значения ν_0 могут быть определены по следующим приближенным формулам при реальных значениях параметра β:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{для ТТ} & \nu_0 = 1; \\ \text{» СТ и ЗТ} & \nu_0 = (1+\beta)^2; \\ \text{» БТ} & \nu_0 = 1+\beta. \end{array}\right\} \qquad (106)$$

Для лучшего уяснения роли режима работы трансформатора (величины ν) приводим на рис. 82 зависимости вторичной мощности трансформатора P_{II} от ν при постоянном перегреве, полученные экспериментально для ряда броневых и стержневых трансформаторов при частоте 400 *гц*.

Необходимо подчеркнуть, что оптимальная величина ν не зависит от качества магнитопровода, т. е. от величины удельных потерь p_{10}. От последней зависит абсолютная величина мощности по (77), но оптимальное распределение потерь сохраняется постоянным, определяемым соотношениями (106).

Т. м. м. нормальной частоты. Найдем то оптимальное значение i_0, при котором трансформатор с малыми потерями p_c может отдать максимальную мощность P_{max}. Подобная задача

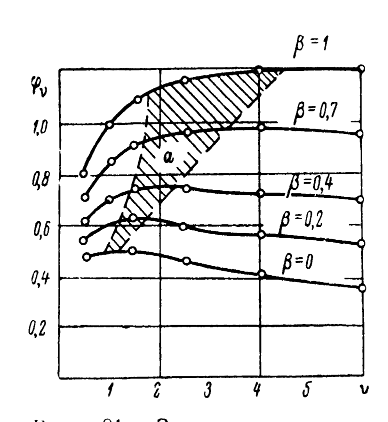


Рис. 81. Зависимость члена φ_ν от ν.
а — зона оптимальных ν.

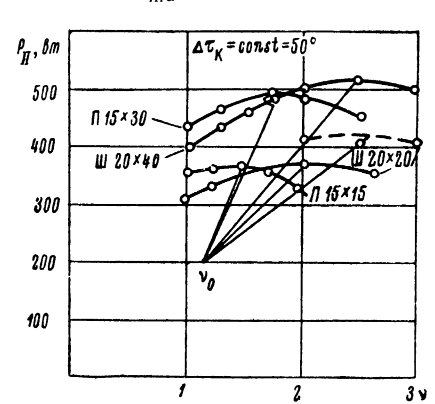


Рис. 82. К определению оптимального соотношения потерь.
——— — нагрев на столе;
- - - - - — нагрев на шасси.

может быть решена путем анализа на максимум от i_0 выражения, стоящего в квадратных скобках в (89). Вынося за скобки постоянные члены, устанавливаем, что необходимо проанализировать выражение

$$\frac{i_0}{\left(1+\sqrt{1+i_0^2}\right)^2}\left[1+\frac{1+\sqrt{1+i_0^2}}{i_0}\,\frac{B_0}{100\kappa_{Fe}}\times\right.$$
$$\left.\times\sqrt{\frac{\rho}{\kappa_{ок}\alpha_к\Delta\tau_к}\,\frac{l_c}{s_{ок}}}\,\sqrt{\frac{V_к}{П_к'}}\right]. \qquad (107)$$

Приняв условно величину этого выражения при $i_0 = 0$ за единицу, можно найти зависимость в относительных единицах P от тока i_0. На рис. 83 представлены зависимости P от i_0 при различных значениях параметра

$$\xi=\frac{B_0}{100\kappa_{Fe}}\sqrt{\frac{\rho}{\kappa_{ок}\alpha_к\Delta\tau_к}\,\frac{l_c}{s_{ок}}}\,\sqrt{\frac{V_к}{П_к'}}. \qquad (108)$$

Крайние кривые соответствуют крайним значениям ξ, могущим иметь место при любых практически возможных сочетаниях определяющих его членов. Из кривых видно, что максимальные мощности соответствуют токам $i_0 = 0{,}3$—$0{,}8$. При больших значениях i_0 роста P практически не наблюдается, т. е. увеличивать i_0 сверх этих величин не имеет смысла. Следует подчеркнуть, что эти значения i_0 относятся к трансформаторам с сердечниками как из холоднокатаной, так и горячекатаной стали и при любой их конструкции.

Следовательно, токи намагничивания $i_0 = 0{,}3$—$0{,}8$ следует считать оптимальными в тех случаях, когда заданным является

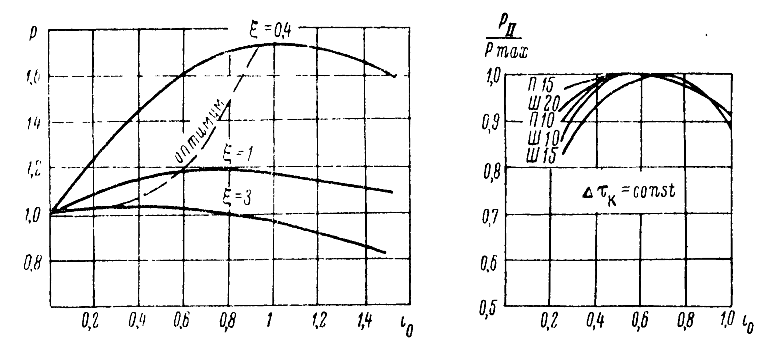


Рис. 83. К определению оптимального тока намагничивания.

только допустимый перегрев. На рис. 83 приведены экспериментальные зависимости $\frac{P_{II}}{P_{max}}$ от i_0, полученные для ряда БТ и СТ на разрезных ленточных сердечниках.

Если нельзя пренебречь величиной p_c по сравнению с $p_к$, как это делалось при выводе (89), и индукция B ограничена уже условиями нагрева, то величины i_0 уменьшатся против указанных (до 0,2—0,15).

Т. м. м. при заданном токе намагничивания. Если одновременно реализуется допустимый перегрев, то в (102) n подставляется по (84) и

$$P \equiv \frac{i_0}{\left(1 + \sqrt{1 + i_0^2}\right)^2}.$$

Эта зависимость в произвольном масштабе построена на рис. 84. Мощность растет с ростом i_0, но эффективно — только до $i_0 = 1$—$1{,}5$. Следовательно, задавать i_0 больше этих величин в этом случае нерационально.

Если величина j ограничена падением напряжения, то в (102) $n = 2$, $P \equiv i_0$ и, естественно, ток i_0 может оказаться любым по величине.

Частота питания. Т. м. м. повышенных частот. Если предположить, что удельные потери p_{10} с увеличением частоты сохраняются постоянными, то по (81) получится, что величина «э» обратно пропорциональна частоте. Однако даже выбором лучшего по качеству и более тонкого материала сердечника постоянство удельных потерь сохранять не удается — эти потери растут.

Рассмотрим другой случай — когда материал сердечника остается неизменным. В этом случае мы можем в (81) ввести зависимость удельных потерь от частоты по (3). Тогда окажется, что зависимость «э» от f выражается членом

$$э \equiv \frac{\sqrt{p_{10}}}{f} \equiv \frac{\sqrt{f^{1,2-1,7}}}{f} \equiv \frac{1}{f^{0,4-0,15}}. \quad (109)$$

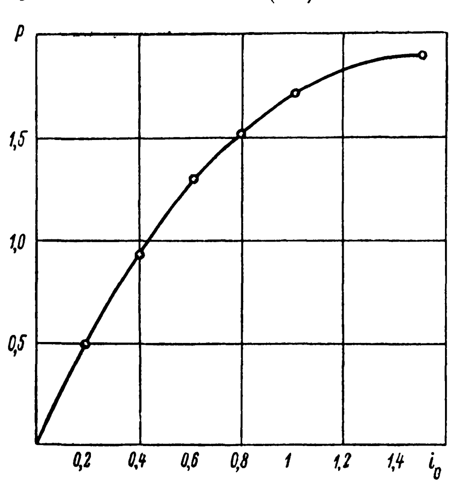


Рис. 84. Зависимость мощности малых т. м. м. на разъемных ленточных сердечниках от намагничивающего тока.

Крайние значения показателей степени соответствуют крайним встречающимся случаям для материалов магнитопровода в толщинах 0,02—0,2 *мм*. Снижения «э» в процентах, рассчитанные в соответствии с этой зависимостью, приведены в табл. 23 для указанных двух крайних толщин. При промежуточных толщинах получим промежуточные результаты по снижению «э». Практически удается достигнуть несколько большего выигрыша, переходя с увеличением частоты к материалам лучшего качества в соответствии с рекомендациями в табл. 7.

Таким образом, влияние частоты оказывается менее замет-

Таблица 23

Снижение веса и объема т. м. м. при повышении частоты питания свыше 400 *гц* и сохранении материала сердечника

f, *гц*		400	500	800	1000	1200	1500	2000	2400	5000
Снижение *g* и *v*, %	при Δ=0,2	0	5	10	13	15	18	21	24	32
	при Δ=0,05—0,02	0	9	24	31	35	41	48	51	64

ным, чем это может показаться на первый взгляд из (81). Физически это объясняется тем, что с ростом частоты для обеспечения теплового режима приходится понижать рабочие индукции в сердечнике. Тем не менее, повышение частоты остается достаточно сильным средством уменьшения габаритов т. м. м. Поэтому в последние годы, наряду с частотой 400 *гц*, находят применение и более высокие частоты — вплоть до 2500 *гц*. В США применяются частоты до 5000 *гц*. На основании сделанных выводов [выражение (109)] можно рекомендовать и дальнейшее повышение частоты (табл. 24).

Таблица 24

Снижение веса и объема т. м. м. при повышении частоты питания свыше 400 *гц* и переходе к улучшенным магнитным материалам

Материал сердечника		Снижение g и v, %, при частотах, *гц*				
Марка	Толщина, *мм*	400	1000	2400	5000	10 000
Э35	0,2	—	13	24	32	40
	0,15	2	18	32	42	50
	0,08	5	28	39	51	59
	0,05	5	32	46	57	64
	0,02	—2	27	45	57	66
50Н	0,15	—	41	50	60	62
	0,05	—	50	62	73	76
80НХС	0,10	—	—	66*	71	74
	0,05	—	—	73*	79	83

* Только для больших мощностей.

В табл. 24 приведены результаты расчета снижения «э» с ростом частоты при одновременном переходе к сердечникам лучшего качества по сравнению со значениями «э» при частоте 400 *гц* и при использовании для сердечника стали Э35 толщиной 0,2 *мм*. Таблица рассчитана в соответствии с выражением

$$э \equiv \frac{\sqrt{p_i}}{f},$$

причем значения p_i брались по табл. 4 и рис. 47.

Как видно из таблицы, переходя последовательно к более тонким сталям и лучшим материалам — 50Н и 80НХС, можно увеличить выигрыш в весах и габаритах в 2—3 раза по сравнению с тем, который достигается при стали толщиной 0,2 *мм*. Из таблицы следует также, что наилучшими материалами, обеспечивающими минимум g и v, являются: для частоты 1000 *гц* — сталь Э35 0,05—0,08 *мм*, сплав 50Н 0,1—0,15 *мм*; для частоты 2400 *гц* — сталь Э35 0,05—0,08 *мм*, сплав 50Н 0,05 *мм*; для ча-

стоты 5000 *гц* — сталь Э35 0,05—0,08 *мм*, сплав 50Н 0,05 *мм*, сплав 80НХС 0,05 *мм*.

Сталь Э35 0,02 *мм* в этом диапазоне частот никакого выигрыша не дает; снижение толщины стали с 0,08 до 0,05 *мм* дает весьма малый эффект. Очень эффективно применение сплавов 50Н и 80НХС, однако они значительно дороже, чем сталь Э35. Применение сплава 80НХС на частотах до 2400 *гц* и при малых мощностях на более высоких частотах ограничено низкой индукцией насыщения сплава. В этих случаях можно применять сплав 33НКМС, дающий почти тот же выигрыш (толщина 0,05 *мм*). Сплав 50Н при повышенных частотах может быть заменен сталью 3СТА 0,05 *мм* с сохранением того же эффекта.

Следует отметить, что реально достигаемые выигрыши несколько ниже указанных в табл. 23 и 24, поскольку с ростом частоты несколько растет сопротивление проводников (ϱ) за счет вытеснения тока, что заметно, правда, лишь при больших мощностях — толстых проводах, и поскольку для разъемных ленточных сердечников потери растут несколько больше, чем для материала (см. табл. 16).

Т. м. м. нормальной частоты. Согласно (94) при промышленной частоте «э» примерно обратно пропорционален частоте. Это верно до тех пор, пока потери в сердечнике не становятся значительными. В противном случае с ростом частоты приходится ограничивать индукцию из условия нагрева, и выигрыш от роста f уменьшается. Особый интерес представляет переход от нормальной частоты к частоте 400 *гц*. Поскольку для трансформаторов повышенной частоты «э» не зависит от мощности P, а для нормальной частоты «э» уменьшается с ростом мощности, выигрыш в весах и габаритах при переходе от 50 *гц* к 400 *гц* уменьшается с ростом мощности.

Расчеты и опыт показывают, что при равной мощности и перегреве 50° для малых трансформаторов (10—20 *ва*) достигается выигрыш в 5—6 раз, для больших (1000—2000 *ва*) — в 2,5—3 раза (имеется в виду использование одного и того же материала, но для каждой частоты при оптимальной толщине). В одном и том же типоразмере на частоте 400 *гц* можно получить бо́льшую мощность для самых малых типоразмеров в 8 раз (максимально), для больших типоразмеров — в 2—2,5 раза. Таким образом, переход к частоте 400 *гц* дает особенно большой эффект для малых трансформаторов.

Т. м. м. при постоянном падении напряжения. По (101) величина «э» примерно обратно пропорциональна частоте f при условии $B = \text{const}$, что имеет место для маленьких трансформаторов. Если, однако, из условий нагрева индукцию B требуется снизить, то зависимость «э» от f будет выражена слабее. Приняв по (4)

$$p_c \equiv f^{1,5}, \quad B \equiv \sqrt{p_c} \equiv f^{0,75},$$

получим

$$Э \approx \frac{1}{\sqrt[3]{f}}.$$

Аналогично влияет частота на показатели малых трансформаторов, рассчитываемых на заданный ток намагничивания [см. (104)].

Перегрев. Т. м. м. повышенных частот. Согласно (77) мощность трансформатора прямо пропорциональна перегреву $\Delta\tau_к$ и коэффициенту теплоотдачи. Удельные показатели по (81) обратно пропорциональны этим величинам. Поэтому повышение рабочего перегрева является действенным средством снижения весов и габаритов т. м. м. повышенной частоты. Отсюда видно, какое важное значение имеет применение для этих трансформаторов изоляционных материалов повышенной нагревостойкости, позволяющих реализовать повышенные перегревы. Увеличение перегрева с 50 до 70°, например, позволяет уменьшить вес и объем трансформатора в 1,4 раза, т. е. на 30%, увеличение перегрева с 50 до 100° — в 2 раза. При $\Delta\tau_к = 100°$ реальный удельный вес в конструкции можно снизить до 1,5 *г/ва*.

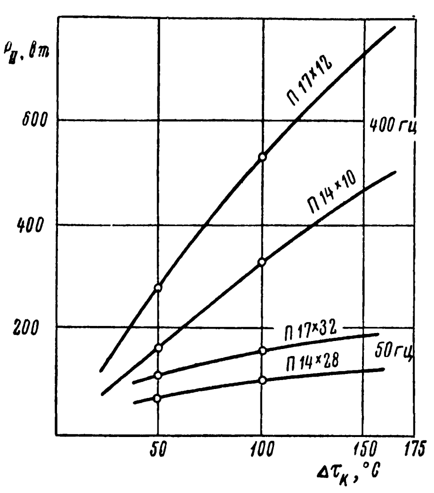


Рис. 85. Влияние величины перегрева на мощность, отдаваемую трансформатором.

В (81) с ростом $\Delta\tau_к$ растет и удельное сопротивление ϱ. Это, однако, не меняет результата, поскольку одновременно примерно в той же степени растет $\alpha_к$ по (54).

В подтверждение сделанного вывода на рис. 85 приведены зависимости вторичной мощности P_{II} от перегрева, полученные экспериментально для различных трансформаторов. Кривые «э» будут обратными по отношению к кривым P_{II}. Аналогично влияет на величину «э» коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$. О мерах по его повышению говорилось в § 16.

Необходимо подчеркнуть, что отмеченная зависимость «э» от $\Delta\tau_к$ будет сохраняться лишь до определенного предела величины перегрева. В самом деле, увеличение перегрева означает возможность увеличения j и B по (75) и (76). Однако из двух этих величин только j можно увеличивать без ограничений (если не ограничивает заданная величина Δu), рост же B ограничивает явление насыщения сердечника. Дальнейший рост выде-

ляющихся в трансформаторе потерь идет только за счет потерь $p_к$, потери же в сердечнике остаются постоянными. Поэтому мы неизбежно придем к условию $p_к \gg p_с$, характерному для трансформаторов нормальной частоты. При этом условии влияние $\Delta\tau_к$ на «э» становится иным. Указанный граничный перегрев $\Delta\tau'_к$ тем выше, чем выше мощность (размеры трансформатора) и чем ниже качество сердечника.

Т. м. м. нормальной частоты. Как отмечалось, это будет также случай и т. м. м. повышенных частот с повышенными перегревами, превышающими $\Delta\tau'_к$. Обращаясь к (94), легко заметить, что здесь зависимость «э» от $\Delta\tau_к$ и $\alpha_к$ выражена слабее и определяется величиной, обратно пропорциональной примерно корню квадратному из $\Delta\tau_к$ и $\alpha_к$. Поэтому для т. м. м. нормальной частоты увеличение перегрева и улучшение теплоотдачи менее эффективны. При тех же, что приводились выше, ростах перегревов с 50° до 70° и до 100° снижение «э» выразится цифрами по (94): 15 и 30%. Экспериментальная зависимость мощности P_{II} от перегрева для т. м. м. на 50 *гц* приведена также на рис. 85.

Т. м. м. при высоких перегревах. Повышение мощности данного трансформатора или, что то же, снижение величины «э» с ростом перегрева не может, однако, происходить беспредельно. Сильное повышение температуры обмоток приводит к заметному росту падения напряжения ΔU, которое не учитывалось при выводе формул (81) и (94). Как следствие при очень больших перегревах рост полезной, вторичной, мощности с ростом $\Delta\tau_к$ все более замедляется.

Существуют такие предельные перегревы, дальнейшее превышение которых не только не дает роста мощности, но приводит даже к ее падению, т. е. росту удельных весов и габаритов. Такими предельными перегревами по данным А. Ф. Сенченкова являются при медных проводах величины 200—400° для частоты 50 *гц* и 350—600° для частоты 400 *гц*. Чем меньше величина Δu, тем выше эта граница.

Коэффициенты заполнения. Влияние коэффициентов заполнения $к_{ок}$ и $к_с$ на удельный объем, удельный вес и удельную стоимость будет различным. Для получения v положим в (81), (94), (101) и (104), что $Э = V$. Тогда окажется: для т. м. м. повышенных частот

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt{к_с к_{ок}}}; \qquad (110)$$

для т. м. м. нормальной частоты

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt[7]{к_с^6 к_{ок}^3}} \approx \frac{1}{к_с \sqrt{к_{ок}}}; \qquad (111)$$

при постоянном падении напряжения

$$v = \frac{1}{\sqrt[5]{к_с^6 к_{ок}^3}} \approx \frac{1}{к_с \sqrt{к_{ок}}}; \qquad (112)$$

при постоянном намагничивающем токе

$$v = \frac{1}{к_{ок}}. \qquad (113)$$

Повышение величин $к_с$ и $к_{ок}$, таким образом, позволяет существенно уменьшать удельный объем (если соблюдена оптимальная геометрия по объему). Влияние $к_{ок}$ примерно одинаково в первых трех случаях и особенно резко выражено в случае заданного тока i_0 для очень малых трансформаторов (по условию рассмотрения). Влияние $к_с$ примерно одинаково и весьма существенно в двух средних случаях; это влияние менее сильно выражено в случае трансформаторов повышенной частоты. Физическая основа полученных зависимостей для наиболее важных первых трех случаев состоит в том, что для сохранения допустимой величины потерь в катушках с ростом $к_{ок}$ приходится снижать плотность тока j, как это следует из (75) и (96). Аналогично для первого случая в соответствии с (76) при увеличении $к_с$ приходится снижать индукцию B.

Большое влияние $к_с$ на «э» для т. м. м. нормальной частоты приводит к выводу, что здесь применение тонких сталей не только бесполезно, поскольку снижение потерь в сердечниках ввиду их малых величин излишне, но и вредно, так как вызывает снижение $к_с$ (см. табл. 13, 15). Сложнее обстоит дело с удельными весом g и стоимостью «ц». Учтем, что

$$G = G_к + G_с = к_{ок}\gamma_к V_к + к_с\gamma_с V_с. \qquad (114)$$

Если из полной стоимости трансформатора выделить имеющую наибольшее значение и поддающуюся строгому учету стоимость активных материалов, то

$$Ц = ц_к G_к + ц_с G_с = ц_к к_{ок}\gamma_к V_к + ц_с к_с \gamma_с V_с. \qquad (115)$$

В этих выражениях $G_к$ и $G_с$ — веса активных материалов катушек и сердечника; $\gamma_к$ и $\gamma_с$ — их удельные веса; $V_к$ и $V_с$ — объемы, занятые катушками и сердечником; $ц_к$ и $ц_с$ — цены единиц веса провода катушек и материала сердечника.

Из (114) и (115) следует, что в (81), (94), (101) и (104) (для э = g и э = ц) $к_с$ и $к_{ок}$ присутствуют не только в явном, но и неявном виде, входя в $к_э$ ($к_g$ или $к_ц$ соответственно). Преобразуем (114) и 115):

$$G = \gamma_к V_к \left(к_{ок} + к_с \frac{\gamma_с}{\gamma_к} \frac{V_с}{V_к} \right), \qquad (116)$$

$$Ц = ц_с \gamma_к V_к \left(\frac{ц_к}{ц_с} к_{ок} + к_с \frac{\gamma_с}{\gamma_к} \frac{V_с}{V_к} \right). \qquad (117)$$

В реальных т. м. м. отношения $\frac{V_c}{V_к}$ лежат в пределах 0,2—3, отношения $\frac{\gamma_c}{\gamma_к}$ при заданных материалах известны.

Дальнейший анализ произведем для различных случаев раздельно.

Т. м. м. повышенных частот. Полагая, что в (81) и (80) $э = g$, $Э = G$ и подставляя G по (116), получим

$$g = \sqrt{\frac{к_{ок}}{к_c}} + \sqrt{\frac{к_c}{к_{ок}} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_к} \cdot \frac{V_c}{V_к}}, \tag{118}$$

$$ц = \frac{ц_к}{ц_c} \sqrt{\frac{к_{ок}}{к_c}} + \sqrt{\frac{к_c}{к_{ок}} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_к} \cdot \frac{V_c}{V_к}}. \tag{119}$$

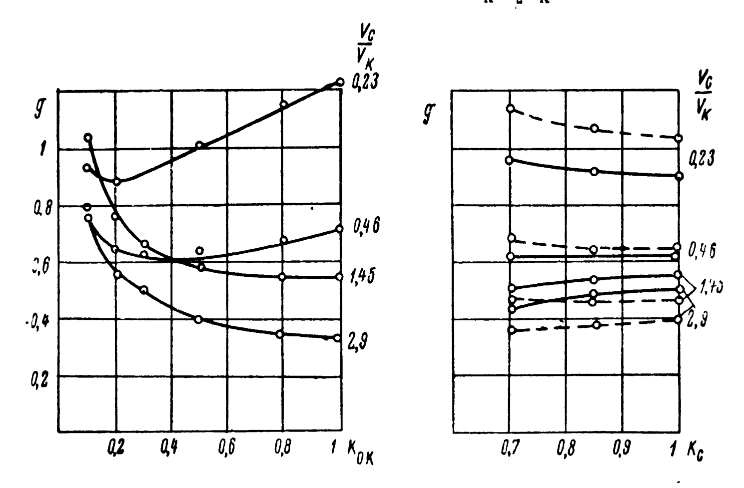


Рис. 86. Зависимость удельного веса т. м. м. от коэффициентов заполнения окна и сердечника.

Кривые g в произвольных масштабах построены по (118) на рис. 86 в функции $к_{ок}$ и $к_c$ при нескольких значениях $\frac{V_c}{V_к}$ для случая медных проводов. Подчеркиваем, что кривые для разных $\frac{V_c}{V_к}$ нельзя сравнивать между собой, поскольку они построены в разных масштабах. Можно лишь определить влияние $к_{ок}$ при данном $\frac{V_c}{V_к}$ (и данном $к_c$) и влияние $к_c$ при данном $\frac{V_c}{V_к}$ (и данном $к_{ок}$). Результаты оказываются весьма интересными.

Максимально возможное повышение $к_c$ и $к_{ок}$ совсем не всегда приводит к снижению удельного веса, как это обычно принято считать. Повышение $к_{ок}$ вплоть до единицы полезно

только при больших отношениях $\frac{V_c}{V_к}$ (т. е. в трансформаторах, «бедных медью»), при этом увеличение $к_{ок}$ эффективно до величин 0,5—0,7. При малых же $\frac{V_c}{V_к}$ (у «богатых медью» трансформаторов) существуют определенные оптимумы $к_{ок}$, лежащие в пределах 0,2—0,4. Увеличение $к_{ок}$ сверх этих значений приводит даже к увеличению удельного веса трансформатора. Аналогичная картина и в отношении $к_c$. В т. м. м., «бедных сталью»,

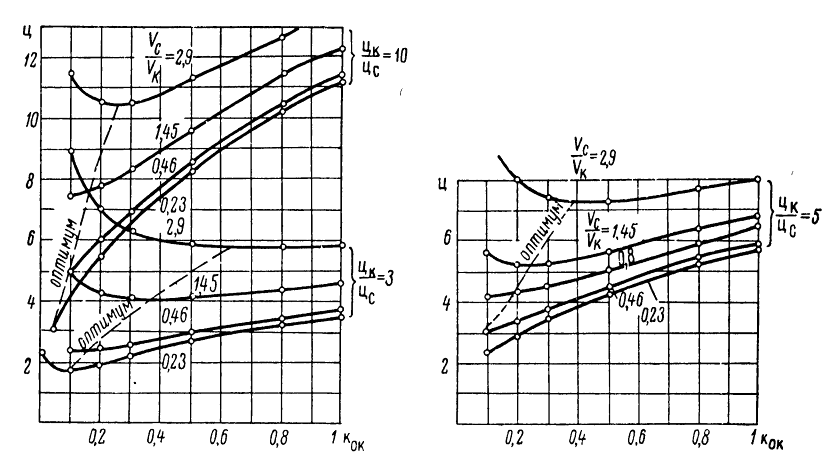


Рис. 87. Зависимость удельной стоимости т. м. м. от коэффициента заполнения окна.

повышение $к_c$ рационально вплоть до единицы, в чрезмерно «богатых сталью» (большие $\frac{V_c}{V_к}$) увеличение $к_c$ выше 0,7—0,8 даже вредно.

Таким образом, с точки зрения получения минимального удельного веса не следует стремиться к достижению $к_{ок}$ выше 0,2—0,4 для т. м. м., «богатых медью» (при весе стали не больше веса меди), в частности, для тороидальных трансформаторов. Наоборот, в т. м. м., «богатых сталью» $\left(\frac{G_c}{G_к} \geqslant 1,5—2\right)$, не следует стремиться к большим $к_c$. Физически сказанное объясняется тем, что в соответствующих случаях снижение j и B из-за роста $к_{ок}$ или $к_c$, согласно (75) и (76), приводит к более медленному росту мощности, чем рост веса по (114) с возрастанием $к_{ок}$ и $к_c$.

В еще большей степени проявляется указанный характер влияния $к_{ок}$ на стоимость «ц». Все минимумы «ц» по сравнению с g сдвинутся в сторону меньших $к_{ок}$, поскольку обычно $\frac{ц_к}{ц_c} > 1$.

На рис. 87 (в произвольных масштабах!) построены по (119) зависимости «ц» от $к_{ок}$ при $к_с = 0{,}9$ и $\frac{ц_к}{ц_с} = 3,\ 5,\ 10$. Из кривых видно, что большие значения $к_{ок}$ выгодно иметь лишь в трансформаторах, «бедных медью», при дешевой меди. При дорогой меди $\left(\frac{ц_к}{ц_с} = 10\right)$ $к_{ок}$ не имеет смысла иметь выше 0,3, так как даже в «богатых сталью» трансформаторах стоимость затраченных материалов при этом начинает возрастать. В трансформаторах с малым отношением $\frac{V_с}{V_к}$ оптимальные $к_{ок}$ лежат не выше 0,15—0,2.

Поскольку $\frac{ц_к}{ц_с} > 1$, то, как это ясно из сопоставления (118) и (119), оптимумы по $к_с$ сдвинутся в сторону бо́льших значений по сравнению с рис. 86.

Из характера влияния $к_{ок}$ на g и «ц» следует, что при существующей геометрии трансформаторов и использовании меди нет никакого смысла переходить от обычных проводников к тонкой фольге (что позволяет резко повысить $к_{ок}$), если только решающим не является требование минимального объема, чего обычно не бывает.

Если вместо меди в трансформаторе применить алюминий, который в 3,3 раза легче меди, то кривые зависимости g от $к_{ок}$ и $к_с$ сохранят свой характер, но прежним значениям $\frac{V_с}{V_к}$ будут соответствовать кривые, у которых значение этого параметра в 3,3 раза меньше. При реальных $\frac{V_с}{V_к}$ получится, что увеличение $к_{ок}$ будет эффективным во всех случаях. Кривые g в зависимости от $к_{ок}$ и $к_с$ приведены на рис. 88. В «богатых алюминием» трансформаторах снижение веса дает увеличение $к_{ок}$ до 0,3 и выше, в «бедных алюминием» — вплоть до единицы, в промежуточных случаях — до $к_{ок} = 0{,}6$—$0{,}8$. Оптимальные значения $к_с$, наоборот, соответственно уменьшаются, и для получения минимума g не следует иметь $к_с$ более 0,7.

Т. м. м. нормальной частоты. Полагая в (94), что $э = g$ и $э = ц$, раскрывая $к_э$ [см. (129) § 20] при $Э = G$ и $Э = Ц$ и беря G и $Ц$ по (116) и (117), получим

$$\left.\begin{aligned} g &\equiv \frac{G}{\sqrt[7]{к_{ок}^3 к_с^6}} \approx \frac{G}{к_с \sqrt{к_{ок}}} \approx \frac{\sqrt{к_{ок}}}{к_с} + \frac{1}{\sqrt{к_{ок}}} \frac{\gamma_с}{\gamma_к} \frac{V_с}{V_к}; \\ ц &\approx \frac{ц_к}{ц_с} \frac{\sqrt{к_{ок}}}{к_с} + \frac{1}{\sqrt{к_{ок}}} \frac{\gamma_с}{\gamma_к} \frac{V_с}{V_к}. \end{aligned}\right\} \quad (120)$$

Все сказанное о $к_{ок}$ справедливо и здесь, поскольку зависимость g и «ц» от $к_{ок}$ практически та же. Повышение же $к_с$ здесь выгодно во всех случаях, поскольку с ростом $к_с$ в выражении (120) g и «ц» монотонно уменьшаются и тем сильнее, чем трансформатор «беднее сталью».

Т. м. м. при заданном падении напряжения. Зависимости g и «ц» от $к_{ок}$ и $к_с$ аналогичны только что рассмотренным, поскольку в отношении этих коэффициентов выражения (101) и (94) примерно аналогичны. Оптимальные значения $к_{ок}$ сдвинутся немного в сторону бо́льших значений.

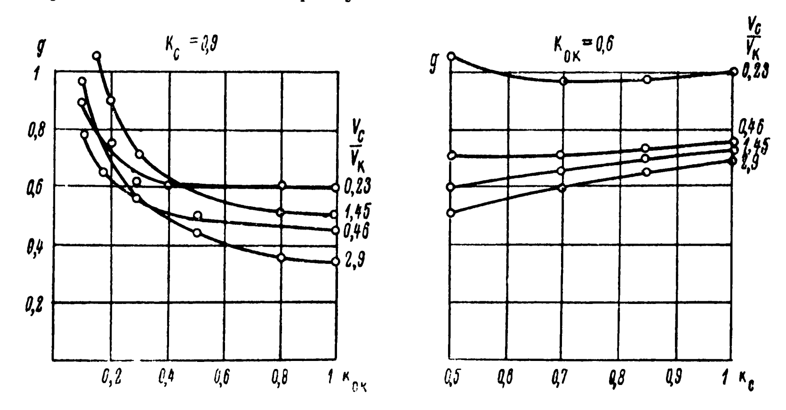


Рис. 88. Зависимость удельного веса т. м. м. от коэффициентов заполнения окна и сердечника при алюминиевых обмотках.

Для малых трансформаторов при заданном токе намагничивания из (104), (105), (116) и (117) получим, что повышение $к_{ок}$ уменьшает g и «ц».

* * *

Таким образом, соблюдение оптимальных величин $к_{ок}$ является серьезным фактором снижения стоимости, а в отдельных случаях и веса т. м. м., оно может принести значительный экономический эффект, особенно в условиях крупносерийного и массового производства. Наряду с соблюдением оптимальных $к_с$, это позволяет в ряде случаев улучшить и технические показатели аппаратуры различного назначения, прежде всего авиационной. Эти до сих пор не замеченные резервы должны быть безусловно использованы при проектировании т. м. м.

Заметим, что на практике могут иметь место отклонения от зависимостей (118)—(120) из-за некоторого изменения условий теплоотдачи при изменении $к_{ок}$ и $к_с$ и из-за реального изменения геометрии трансформатора по сравнению с принятой в анализе (см. § 20). Важно отметить, что по последней причине использование уменьшенных величин $к_{ок}$ во многих случаях не приводит к увеличению объема трансформатора.

Вопросы выбора оптимальных коэффициентов заполнения окна тесно связаны с вопросами оптимальной геометрии и принципами построения рядов сердечников трансформаторов. Соответствующее рассмотрение будет проведено в дальнейшем (см. § 20 и 21).

Материал сердечника. Для т. м. м. повышенной частоты критерием качества сердечника является величина удельных потерь в нем. По (81) $э \equiv \sqrt{p_{10}}$ (при равных $к_с$).

В табл. 25 приведены данные, характеризующие снижение g и v при переходе последовательно к более качественным материалам. Величины p_{10} взяты по табл. 3. Строго говоря, следовало бы взять потери для готовых сердечников по (5), однако для сопоставления это не имеет значения.

Таблица 25

Снижение g и v при переходе последовательно к более качественным материалам

Материал	Толщина, *мм*	p'_{10} при 400 *гц*, *вт/кг*	Снижение v и g, %, по отношению к			
			предыдущему материалу	Э44 0,35 *мм*	Э44 0,2 *мм*	Э35 0,2 *мм*
Э44	0,35	19	—	—	—	—
	0,2	12,5	19	19	—	—
	0,1	10,5	8	25	8	—
Э35	0,2	9,5	5	29	13	—
	0,15	9	2	31	15	2
	0,08	8,5	3	33	18	5
	0,05	8,5	0	33	18	5

Переход от штампованных наборных сердечников из стали Э44 0,2 *мм* к ленточным сердечникам из холоднокатаной стали Э35 0,15 *мм* обеспечивает снижение веса и объема трансформаторов примерно на 15—20% (если величина индукции ограничена условиями нагрева). Выигрыша в стоимости материалов практически не получается ввиду того, что сталь Э35 несколько дороже. Переход от одной группы качества ленточных сердечников к соседней (см. табл. 17) приводит к разнице в весе и объеме на 7% (при сохранении $\Delta\tau_к$).

Роль материала при повышении частоты сверх 400 *гц* была рассмотрена выше.

Для т. м. м. нормальной частоты и рассчитываемых на заданное падение напряжения решающую роль играет величина индукции на колене кривой

намагничивания. Согласно (94) переход от горячекатаных ($B_0 = 10\,500$ *гс*) сталей к холоднокатаным ($B_0 = 15\,500$ *гс*) с использованием ленточных сердечников дает снижение веса и объема в $\sqrt[7]{\left(\frac{15\,500}{10\,500}\right)^6} = 1{,}4$ раза, т. е. примерно на 30%. Практически тот же результат получается по (101). Стоимость материалов, несмотря на удорожание стали, снижается на 10—20%. Как видим, выигрыш более существенен, чем для трансформаторов повышенной частоты. Следовательно, переход к холоднокатаным сталям особенно эффективен для т. м. м. нормальной частоты и для т. м. м., рассчитываемых на падение напряжения (т. е. при ограничении величины индукции условиями намагничивания).

Большой выигрыш достигается и для трансформаторов с заданным током намагничивания.

Некоторое распространение на практике получили наборные сердечники, пластины которых штампованы из холоднокатаной текстурованной стали. Как показывают расчеты, на повышенных частотах такие трансформаторы не имеют никаких преимуществ по сравнению с трансформаторами на сердечниках из горячекатаной стали Э44 0,2 *мм*, а на частоте 50 *гц* достигаемый выигрыш снижается до 15—20% (по сравнению с Э43 0,35 *мм*). Применение тороидальных сердечников со штампованными пластинами из текстурованной стали не дает выигрыша ни в каких случаях.

Проводниковый материал (применение алюминия). Влияние материала проводов характеризуется в выражении для «э» величинами удельного сопротивления ϱ и удельного веса $\gamma_к$ (входящего в $\kappa_э$ для $Э = G$). Практический интерес представляет один конкретный вопрос — возможность замены меди алюминием. Из (81), (94), (101), (110)—(112) и (114) следует, что для всех случаев с достаточной точностью

$$v \equiv \sqrt{\frac{\rho}{\kappa_{ок}}};\quad g \equiv \sqrt{\frac{\rho}{\kappa_{ок}}}\left(\frac{\gamma_к}{\gamma_с}\kappa_{ок} + \kappa_с\frac{V_с}{V_к}\right). \qquad (121)$$

Все величины, относящиеся к случаю медных проводов, будем снабжать индексом «м», к случаю использования алюминия — индексом «а». Тогда на основании (121) изменение v и g при переходе к алюминию будет выражаться отношениями

$$\frac{v_а}{v_м} = \sqrt{\frac{\rho_а}{\rho_м}\frac{\kappa_м}{\kappa_а}}, \qquad (122)$$

$$\frac{g_а}{g_м} = \sqrt{\frac{\rho_а}{\rho_м}}\sqrt{\frac{\kappa_м}{\kappa_а}}\,\frac{\kappa_а\frac{\gamma_а}{\gamma_с} + \kappa_с\frac{V_с}{V_к}}{\kappa_м\frac{\gamma_м}{\gamma_с} + \kappa_с\frac{V_с}{V_к}}. \qquad (123)$$

Имея в виду, что

$$\frac{\rho_а}{\rho_м}=1,6, \qquad (124)$$

получим из (122), что при равных $к_{ок}$ ($к_м = к_а$) трансформатор с алюминиевыми обмотками будет всегда больше по объему примерно на 30%. Иначе может обстоять дело с весом, поскольку алюминий в 3,3 раза легче меди.

Отношение $\frac{g_а}{g_м}$ по (123) построено на рис. 89 в зависимости от $к_{ок}$ для различных $\frac{V_c}{V_к}$. Из рисунка видно, что переход к алюминию при равных $к_{ок}$ и $к_с$ дает выигрыш в весе $\left(\frac{g_а}{g_м}<1\right)$ для трансформаторов, «бедных сталью» и со средним ее количеством при достаточно больших $к_{ок}$, причем этот выигрыш тем больше, чем больше $к_{ок}$. Объяснение этим фактам дают кривые на рис. 86 и 88, рассматривавшиеся выше: $g_м$ с ростом $к_{ок}$ уменьшается гораздо медленнее (а при малых $\frac{V_c}{V_к}$ даже растет), чем $g_а$. На рис. 89 приведены одновременно кривые $g_м$ и $g_а$ для средних величин $\frac{V_c}{V_к}$, причем при каждом $\frac{V_c}{V_к}$ масштабы $g_а$ и $g_м$ одинаковы.

Чтобы правильно оценить эффект от применения алюминия, учтем, что использование его в виде фольги (см. § 12) обеспечивает получение $к_{ок}$ до 0,6—0,8. Удельные веса трансформатора с алюминиевыми обмотками при этих $к_{ок}$ надо сравнить с удельными весами трансформаторов с медными обмотками при оптимальных $к_{ок} = 0,4$ для $\frac{V_c}{V_к} = 0,46$, $к_{ок} = 0,6—0,8$ для $\frac{V_c}{V_к} = 1,45$. Выигрыш при этих условиях составляет около 30% для менее «богатого сталью» трансформатора и около 10% для более «богатого» (см. рис. 89). В первом случае согласно (121) будет получен и некоторый выигрыш в объеме. Во втором случае в объеме по-прежнему будет иметь место проигрыш.

Если для случая алюминия сохранить $к_{ок}$ на уровне его величины для круглых медных проводов (0,25—0,35), то, как видно из рис. 89, при $\frac{V_c}{V_к} = 0,46$ получим экономию в весе 5—12%, а при $\frac{V_c}{V_к} = 1,45$ вместо экономии окажется проигрыш в несколько процентов. В объеме проигрыш получится для обоих значений $\frac{V_c}{V_к}$. Таким образом, применение алюминия в виде обычных круглых проводов улучшения показателей т. м. м.

дать не может. Другое дело при использовании его в виде фольги при высоких $к_{ок}$. Здесь налицо существенное улучшение экономических показателей трансформатора. Можно также ожидать повышения коэффициента теплоотдачи за счет прямого теплоотвода через торцы фольговой катушки.

Отметим, что вопрос об эффективности внедрения алюминия тесно связан с геометрией трансформатора (отношение $\frac{V_c}{V_к}$), на что соответствующее внимание будет обращено в следующем параграфе. Напомним также, что при повышенных частотах особенностью оптимального по весу трансформатора с алюминиевыми обмотками является пониженная величина $к_c$ (см. рис. 88). Использование алюминия в виде фольги особенно удобно осуществляется в галетных трансформаторах (см. гл. II), что является одним из достоинств этой конструкции.

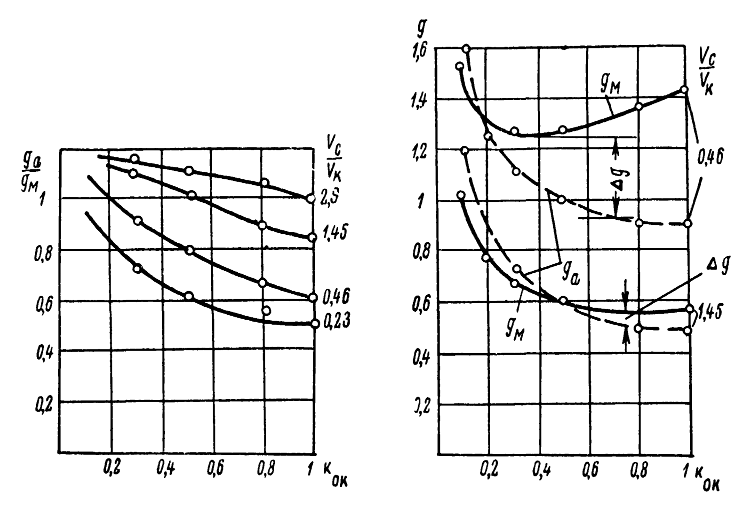


Рис. 89. Сравнение удельных весов т. м. м. с медными и алюминиевыми обмотками.

Говоря о применении алюминия вместо меди, следует учитывать и то обстоятельство, что он менее дефицитен. После преодоления некоторых технологических трудностей т. м. м. с алюминиевыми обмотками получат самые широкие перспективы применения в технике.

* * *

Мы рассмотрели влияние на показатели т. м. м. всех факторов, за исключением геометрии. Анализ этого вопроса производится в следующем параграфе. Напоминаем, что разбивка трансформаторов на группы, по которым ведется рассмотрение, содержит условности, оговоренные в § 15.

§ 20. ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ Т. М. М.

Выражение основных характеристик трансформатора через его геометрию. Геометрия трансформатора — это совокупность соотношений его основных размеров. Придать трансформатору оптимальную геометрию — значит обеспечить его минимальный вес, объем, стоимость, так как при всех прочих равных данных согласно (81), (94), (101) и (104) $э \equiv к_э$. Геометрия трансформатора при полном использовании окна целиком определяется геометрией сердечника, поскольку она для данного сердечника получается однозначной. Геометрия же сердечника, в свою очередь, может быть целиком охарактеризована тремя соотноше-

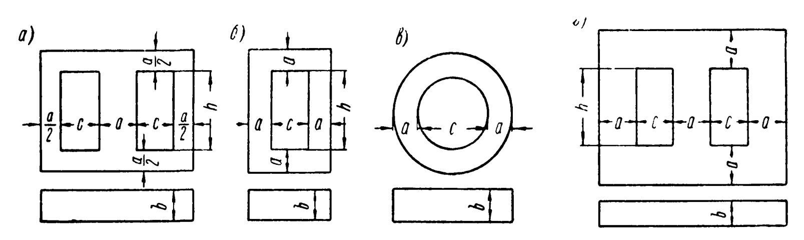


Рис. 90. Обозначения основных размеров сердечников различных типов: *а* — броневой; *б* — стержневой; *в* — тороидальный; *г* — трехфазный.

ниями из четырех его основных размеров — ширины и толщины стержня и ширины и высоты окна. Обозначения этих размеров для всех типов трансформаторов показаны на рис. 90. Взяв один из размеров за базовый, можно остальные три выразить в долях этого размера, т. е. в относительных единицах. Примем за такой базовый размер ширину стержня a. Тогда геометрия т. м. м. полностью определится тремя соотношениями

$$x=\frac{c}{a};\quad y=\frac{b}{a};\quad z=\frac{h}{a}. \qquad (125)$$

Иначе

$$c=xa;\quad b=ya;\quad h=za. \qquad (126)$$

Через базовый размер a и безразмерные коэффициенты x, y, z можно выразить все характеристики трансформатора, зависящие от геометрических размеров: сечения, поверхности, объем, а при использовании дополнительно некоторых постоянных величин также и вес и стоимость. Например, геометрическое сечение сердечника $s_с = ab$, с учетом (126) $s_с = ya^2$. Объем броневого трансформатора

$$V=2(a+c)(b+2c)(a+h);$$

с учетом (126)

$$V=2(1+x)(y+2x)(1+z)a^3.$$

Используя (114) и выражения для объемов V_c и $V_к$, можно написать для веса (сердечника и катушек) БТ

$$G=\gamma_к\kappa_{ок}2ch\left(a+b+\frac{\pi}{2}c\right)+\gamma_c\kappa_c 2ab(a+c+h)=$$

$$=\left[\gamma_к\kappa_{ок}2xz\left(1+\frac{\pi}{2}x+y\right)+\gamma_c\kappa_c 2y(1+x+z)\right]a^3.$$

Аналогично пишутся остальные выражения.

Легко видеть, что все рассматриваемые величины выражаются формулами вида

$$\varphi_i(x,\ y,\ z)\,a^{\sigma}, \tag{127}$$

где σ может принимать значения от 1 до 3, а характер функции φ_i зависит от определяемой величины и типа трансформатора. При этом функции φ_i дается индекс, связанный с определяемой величиной — для сечения сердечника она записывается как φ_s, объема трансформатора — φ_v, стоимости (цены) — $\varphi_ц$ и т. д. Полная сводка подобных зависимостей и функций φ_i, используемых далее, приведена в табл. 26. (G, V и Ц понимаются так, как это было оговорено в § 18.)

Метод анализа. Если подставить формулы типа (127) согласно табл. 26 в (80), (93), (100) и (105) и произвести в (93), (100) и (105) алгебраические преобразования для исключения абсолютного размера a, то выражения для коэффициентов геометрии $\kappa_э$ примут следующий вид:

при постоянном перегреве $\Delta\tau_к$ для т. м. м.:

повышенных частот

$$\kappa_э=\varphi_э\frac{\sqrt{\varphi_c\varphi_к}}{m\varphi_s\varphi_{ок}\varphi_{пк}(1+\beta)}, \tag{128}$$

нормальной частоты

$$\kappa_э=\varphi_э\sqrt[7]{\left[\left(\frac{1}{m\varphi_s\varphi_{ок}}\right)^2\frac{\varphi_к}{\varphi'_{пк}}\right]^3}; \tag{129}$$

при постоянном падении напряжения Δu

$$\kappa_э=\varphi_э\sqrt[5]{\left[\frac{\varphi_к}{m(\varphi_s\varphi_{ок})^2}\right]^3}; \tag{130}$$

при постоянном токе намагничивания i_0

$$\kappa_э=\varphi_э\frac{1}{\varphi_{ок}\sqrt{\varphi_s}}. \tag{131}$$

Функции φ_i берутся по табл. 26. При этом, если рассматривается удельный вес $э=g$, то в (128)—(131) надо положить $\varphi_э=\varphi_g$. Соответственно получим $\kappa_э=\kappa_g$. При рассмотрении

Функции геометрии φ_i для различных типов т. м. м.

Расшифровка φ_i			Значения φ_i для трансформаторов				
φ_i	Чему соответствует	Связь с базовым размером a	броневого — БТ	стержневого — СТ	тороидального — ТТ	трехфазного — 3Т	однокатушечного стержневого — 1СТ
φ_l	l_c	$l_c = \varphi_l a$	$2\left(x+z+\frac{\pi}{4}\right)$	$2\left(x+z+\frac{\pi}{2}\right)$	$\pi(x+1)$	$3x+2z+4{,}4$	$2\left(x+z+\frac{\pi}{2}\right)$
φ_s	s_c	$s_c = \varphi_s a^2$	y	y	y	y	y
$\varphi_{ок}$	$s_{ок}$	$s_{ок} = \varphi_{ок} a^2$	xz	xz	$\frac{1}{4}\pi x^2$	$\frac{1}{2}xz$	xz
$\varphi_{пк}$	$П_к$	$П_к = \varphi_{пк} a^2$	$2[\pi x(x+z)+2x+z]$	$2\left[\frac{\pi x}{2}(x+2z)+(x+z)(y+2)\right]$	$\pi\sqrt{2x^2+4x+4}\left(\frac{x}{2}+y+\frac{1}{2}\sqrt{2x^2+4x+4}\right)$	$2\left[\frac{\pi x}{2}\left(\frac{x}{2}+z\right)+(x+z)\right]$	$2\left[\pi x(x+z)+\left(x+\frac{z}{2}\right)(y+2)\right]$
$\varphi_{пс}$	$П_с$	$П_с = \varphi_{пс} a^2$	$2[y(2x+z+3)+2x+z+2]$	$2[y(x+4)+2x+4]$	0	$\frac{2}{3}(2x+3)(y+2)$	$2\left[y\left(x+\frac{z}{2}+2\right)+2x+z+4\right]$
$\varphi'_{пк}$	$П'_к$	$П'_к = \varphi'_{пк} a^2$	$2[\pi x(x+z)+(2x+z)(y+1)]$	$2\left[\frac{\pi x}{2}(x+2z)+2(x+z)(y+1)\right]$	$\varphi'_{пк} = \varphi_{пк}$	$2\left[\frac{\pi x}{2}\left(\frac{x}{2}+z\right)+y(x+1)+x+z\right]$	$2\left[\pi x(x+z)+\left(x+\frac{z}{2}\right)(3y+2)\right]$
$\varphi_к$	$V_к$	$V_к = \varphi_к a^3$	$2xz\left(\frac{\pi x}{2}+y+1\right)$	$2xz\left(\frac{\pi x}{4}+y+1\right)$	$\frac{\pi}{2}\left(\frac{x}{2}+y\right)(x^2+2x+2)-\pi y(x+1)$	$xz\left(\frac{\pi x}{4}+y+1\right)$	$2xz\left(\frac{\pi x}{2}+y+1\right)$
$\varphi_с$	$V_с$	$V_с = \varphi_с a^3$	$2y(x+z+1)$	$2y(x+z+2)$	$\pi y(x+1)$	$\frac{1}{3}y(4x+3z+6)$	$2y(x+z+2)$
$\varphi_э$: φ_v	V	$V = \varphi_v a^3$	$2(x+1)(2x+y)(z+1)$	$2(x+1)(x+y)(z+2)$	$2(x^2+2x+2)\left(\frac{x}{2}+y\right)$	$3(x+1)(x+y)(z+2)$	$2(x+1)(2x+y)(z+2)$
$\varphi_э$: φ_g	G	$G = \varphi_g a^3$	$m(к_{ок}\gamma_к\varphi_к + к_с\gamma_с\varphi_с)$				
$\varphi_э$: $\varphi_ц$	Ц	$Ц = \varphi_ц a^3$	$m10^{-3}ц_с\left(\frac{ц_к}{ц_с}к_{ок}\gamma_к\varphi_к + к_с\gamma_с\varphi_с\right)$				
$\varphi_э$: $\varphi_э$	Э	$Э = \varphi_э a^3$	$\varphi_э$ есть либо φ_v, либо φ_g, либо $\varphi_ц$				

Примечания. 1. Для 3Т объем V дан на весь трансформатор, все остальные величины—на одну фазу; при этом φ_l — для крайних фаз; $\varphi_{пк}$, $\varphi'_{пк}$ — для средней фазы; $\varphi_с$, $\varphi_{пс}$ — как одна треть от полных величин на трансформатор.

2. $\gamma_к$, $\gamma_с$ — удельные веса активных материалов катушки и сердечника.

3. Влияние закруглений углов у прямоугольных ленточных сердечников не учитывается (погрешность по весу сердечника при этом около 5%).

4. Значения $\varphi_{пк}$, $\varphi_{пс}$, $\varphi'_{пк}$, $\varphi_к$, φ_v даны для случая полного заполнения окна сердечника катушкой.

удельного объема $э = v$, $\varphi_э = \varphi_v$ и $к_э = к_v$, при рассмотрении удельной стоимости $э = ц$, $\varphi_э = \varphi_ц$ и $к_э = к_ц$.

Поскольку каждый тип трансформатора имеет свои выражения для φ_i (см. табл. 26), коэффициенты геометрии оказываются различными также и для разных типов. Таким образом, необходимо найти оптимальную геометрию для каждого типа трансформатора при каждом из рассматриваемых условий.

Влияние геометрии на удельный вес трансформатора будет зависеть также от вида проводникового материала (медь или алюминий), поскольку входящий в $к_g$ параметр φ_g содержит согласно табл. 26 величину удельного веса этого материала $\gamma_к$. Влияние геометрии на стоимость будет зависеть от соотношения стоимостей материала катушек и сердечника $\frac{ц_к}{ц_с}$ (см. выражение для $\varphi_ц$). Все это следует учесть при анализе оптимальной геометрии.

Соответствующий анализ может быть произведен по выражениям (128) — (131) путем графических построений $к_v$, $к_g$, $к_ц$ в функции трех переменных x, y, z. Рассмотрение серии подобных графиков и сопоставление их между собой позволяет найти оптимальные сочетания x, y, z.

Заранее оговорим, что зависимости $к_э$ от геометрии выражены весьма мягко, т. е. можно говорить не об оптимальных величинах x, y, z, а об оптимальных зонах значений этих величин. Кроме того, выбирая оптимальную геометрию сердечников, следует сообразоваться с технологическими особенностями изготовления трансформаторов. Так, недопустимо принимать слишком малые значения x (очень узкие окна) и слишком малые или слишком большие y (из условий намотки катушек). Из условий приемлемого соотношения габаритных размеров трансформатора нереальны слишком большие или слишком малые значения z. Следует также учитывать замечания о величине $\frac{l_{c_{max}}}{l_{c_{min}}}$, приведенные в § 11.

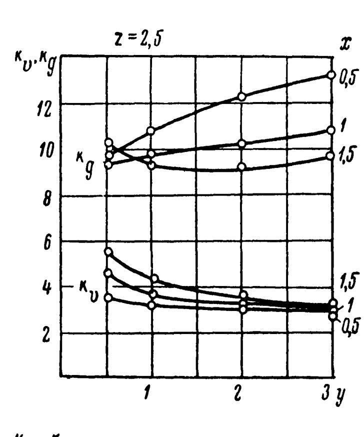
При анализе величин g и «ц», т. е. при построении $к_g$ и $к_ц$, учтем, что проектирование т. м. м. на заданный перегрев производится обычно для бо́льших мощностей, на заданные Δu и i_0 — для меньших мощностей (§ 15). Поскольку бо́льшим мощностям соответствуют бо́льшие величины $к_{ок}$, то принимаем: в первом случае для медных катушек $к_{ок} = 0{,}3$, для алюминиевых катушек $к_{ок} = 0{,}6$; во втором случае, соответственно, $к_{ок} = 0{,}2$ и $к_{ок} = 0{,}4$ (см. § 12). Величины $\gamma_к$ — по § 7.

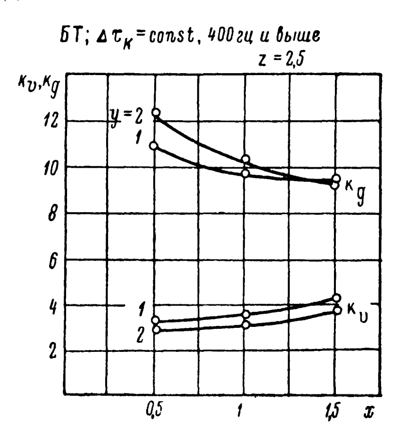
Заметим, что оптимальная геометрия может обеспечить либо получение минимальных величин «э» при заданных, постоянных, $\Delta\tau_к$, Δu, i_0, либо, если абсолютные размеры сердечника выбраны «с запасом»,— получение минимальных $\Delta\tau_к$, Δu, i_0. Поэтому термины «оптимальная геометрия при заданном (постоянном) $\Delta\tau_к$

(Δu, i_0)» и «оптимальная геометрия из условий обеспечения минимального $\Delta\tau_к$ (Δu, i_0)» являются идентичными.

Зависимость показателей т. м. м. от геометрии. Рассмотрим последовательно различные типы т. м. м.

Броневые трансформаторы — БТ. Сперва возьмем обычный случай медных проводов.





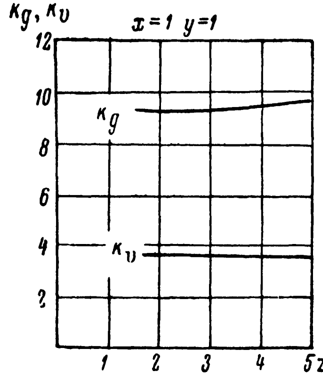


Рис. 91. Зависимость коэффициентов геометрии БТ от геометрии на повышенных частотах (при постоянном перегреве).

Для т. м. м. повышенных частот при постоянном перегреве кривые $к_v$ и $к_g$ приведены на рис. 91, для т. м. м. нормальной частоты — на рис. 92. На рис. 92 дополнительно показаны также кривые $к_ц$ при $\frac{ц_к}{ц_с} = 2$, 3 и 20 (в произвольных масштабах). Кривые $к_g$, $к_v$ и $к_ц$ при постоянном падении напряжения приведены на рис. 93 $\left(\text{принято } \frac{ц_к}{ц_с} = 5\right)$. При постоянном токе намагничивания ограничимся приведением на рис. 94 кривой $к_v$.

В случае алюминиевых обмоток изменятся кривые $к_g$, которые и приводим для этого случая на рис. 95 (при условиях: $\Delta\tau_к$ = const, повышенные частоты, и Δu = const).

Отметим, что первые работы по исследованию оптимальной геометрии БТ при частоте 50 *гц* были проведены в СССР д-ром техн. наук Г. С. Цыкиным.

Стержневые трансформаторы — СТ. Ряд кривых, характеризующих зависимость от геометрии веса (при медных проводах), объема и стоимости СТ, приведены на рисунках:

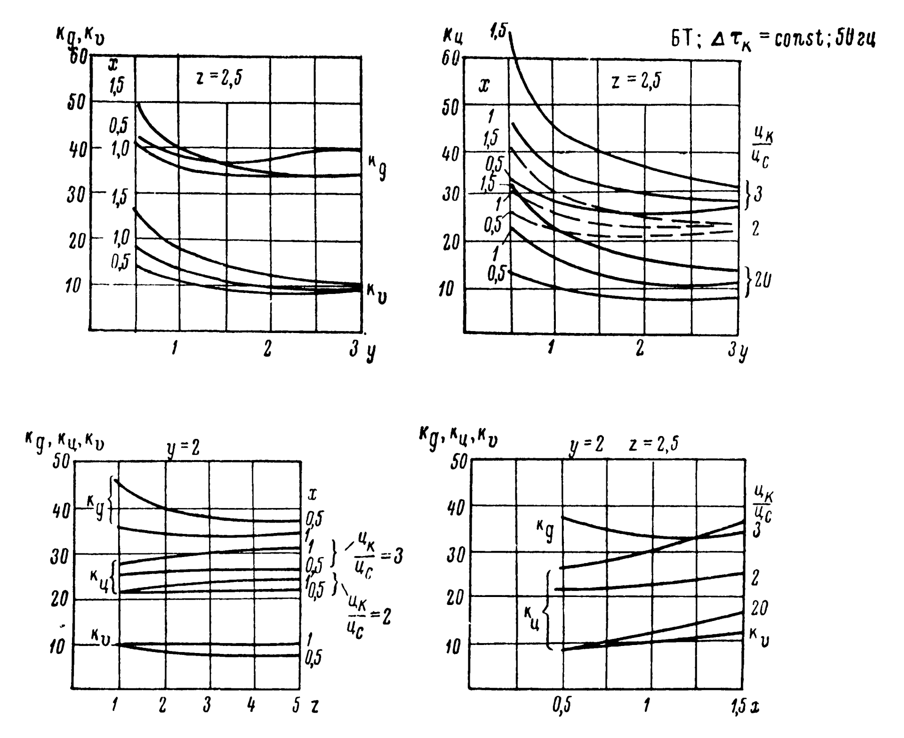


Рис. 92. Зависимость коэффициентов геометрии БТ от геометрии на нормальной частоте (при постоянном перегреве).

96 — при постоянном перегреве на повышенных частотах, 97 — для того же случая при нормальной частоте, 98 — при постоянном падении напряжения, 99 — при постоянном токе намагничивания. На рис. 100 приведены последние две группы кривых для однокатушечного стержневого трансформатора 1СТ. Кривые $к_g$ для СТ с алюминиевыми обмотками приведены на рис. 101.

Тороидальные трансформаторы — ТТ. Примеры кривых $к_v$ и $к_g$ приведены на рис. 102 для постоянного перегрева при повышенных частотах, на рис. 103 — для тех же условий при нормальной частоте и на рис. 104 — для постоянного падения напряжения (обмотки медные).

Трехфазные трансформаторы — 3Т (в обычном исполнении по рис. 1, 3, 4).

Кривые $к_v$ и $к_g$ для разных условий приведены на рис. 105—107 (обмотки медные).

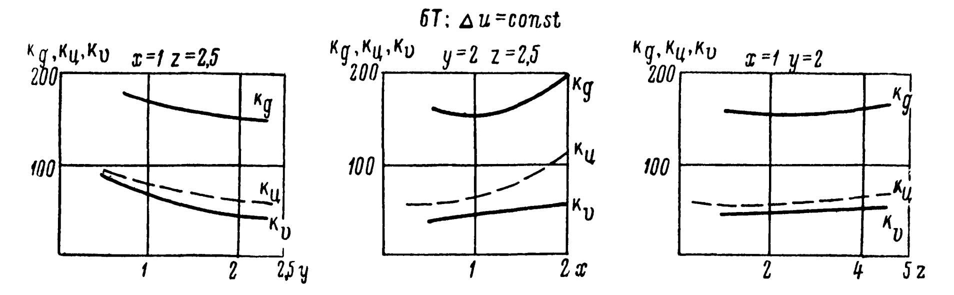


Рис. 93. Зависимость коэффициентов геометрии БТ от геометрии при постоянном падении напряжения.

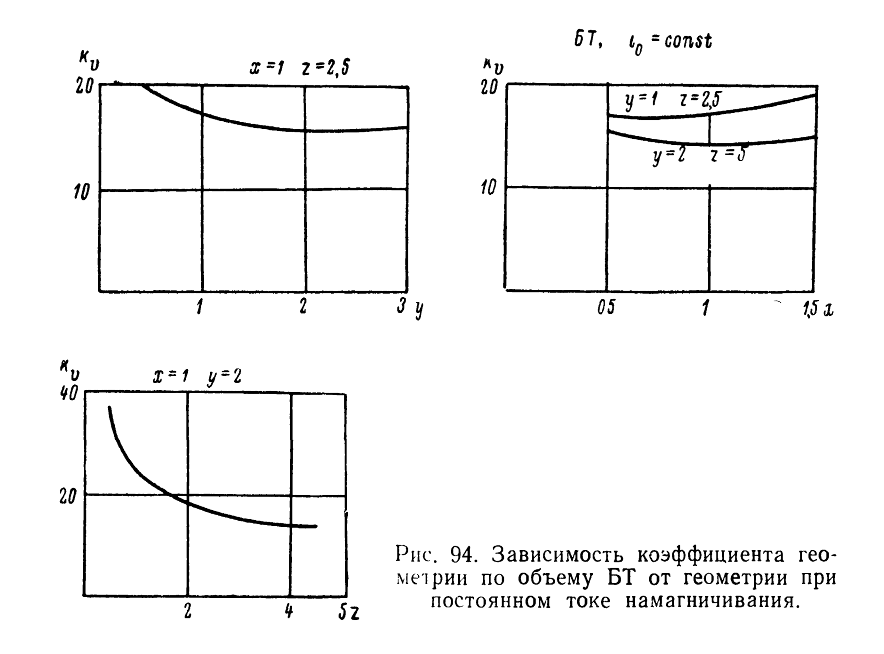


Рис. 94. Зависимость коэффициента геометрии по объему БТ от геометрии при постоянном токе намагничивания.

Анализ оптимальной геометрии. Прежде всего обратимся к случаю трансформаторов повышенной частоты, рассчитываемых на заданный перегрев.

Из рассмотрения кривых на рис. 91, 96, 102, 105 видно, что условия минимального веса ($к_g$) и минимального объема ($к_v$) не

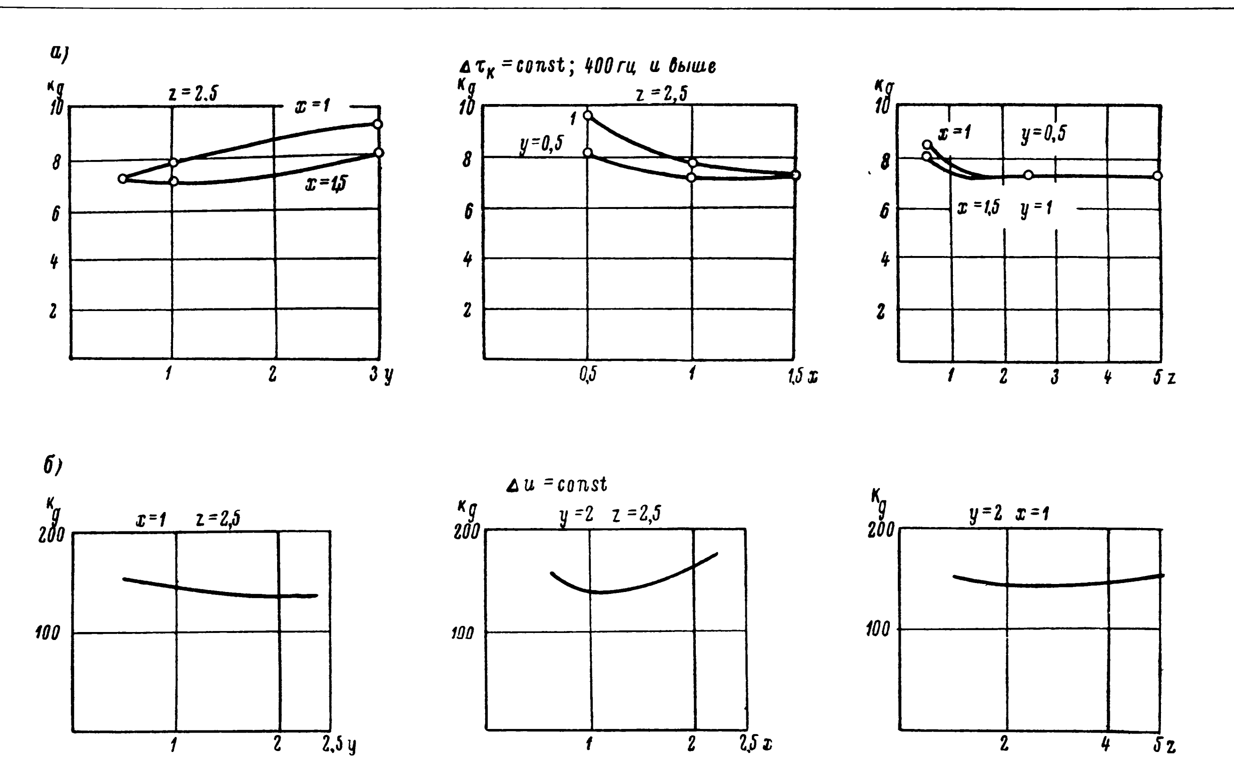
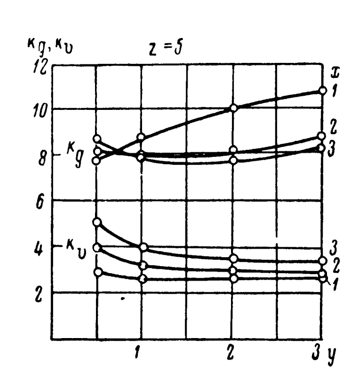
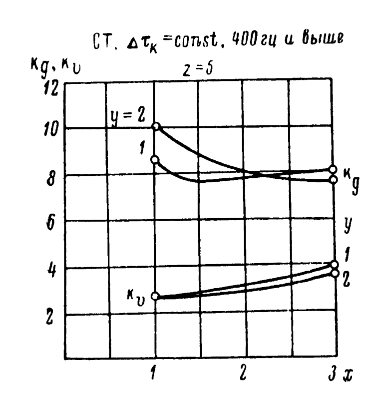


Рис. 95. Зависимость коэффициента геометрии по весу БТ от геометрии при алюминиевых обмотках: *а* — повышенные частоты (при постоянном перегреве); *б* — при постоянном падении напряжения.

совпадают между собой. Зависимости κ_v и κ_g от x и y носят в ряде случаев взаимообратный характер. Поэтому для трансформаторов наименьшего объема и наименьшего веса геометрия, строго говоря, различна. Можно, однако, наметить такую «компромиссную геометрию», при которой оба эти требования примиряются в достаточной мере. При необходимости же строгого выполнения того или иного из них (наименьшего объема или





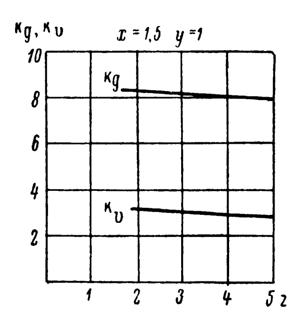


Рис. 96. Зависимость коэффициентов геометрии СТ от геометрии на повышенных частотах (при постоянном перегреве).

наименьшего веса) приходится выбирать ту или иную геометрию.

Из кривых видно также, что для БТ, СТ и ЗТ менее всего сказывается на показателях трансформатора изменение в широких пределах параметра z. Поэтому при построении рядов сердечников (в тех случаях, где это не встречает препятствий) наиболее рационально варьировать в необходимых пределах именно этот параметр (т. е. высоту окна h).

Тороидальный трансформатор характеризуется лишь двумя геометрическими параметрами — x и y. Поэтому возможности

вариаций геометрии здесь более ограничены. Ни x, ни y не могут изменяться в широких пределах, не вызывая заметных отклонений от минимума κ_v и κ_g. Лучше одновременно и пропорционально изменять в одну сторону x и y, изменяя размер a и со-

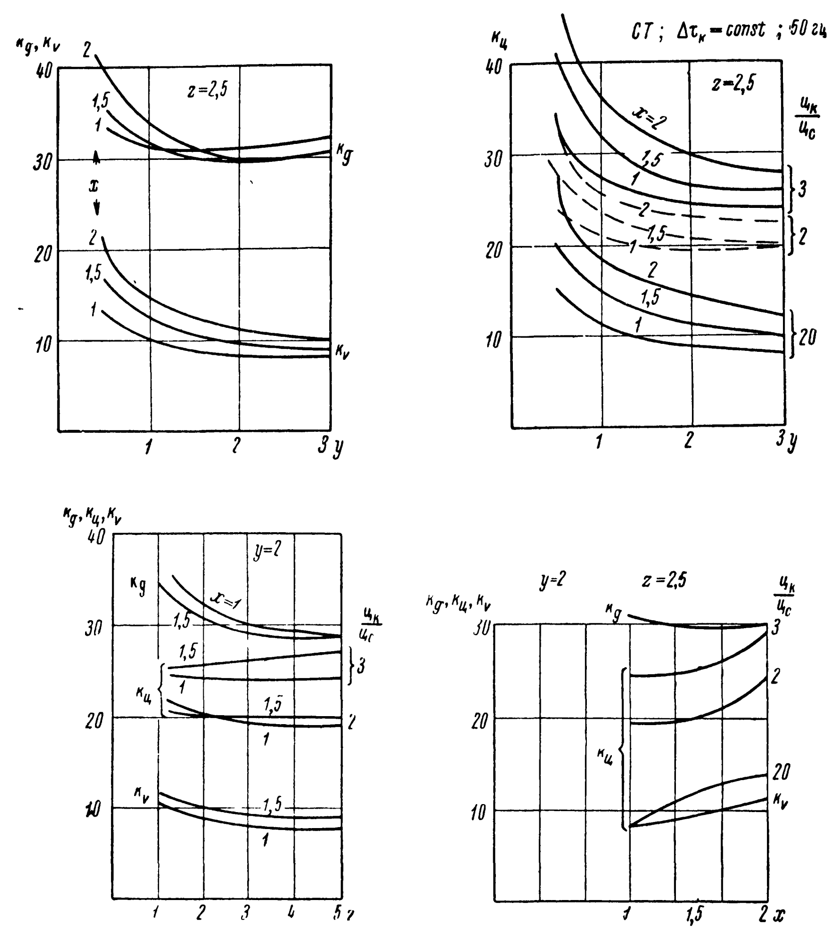


Рис. 97. Зависимость коэффициентов геометрии СТ от геометрии на нормальной частоте (при постоянном перегреве).

храняя размеры b и c (см. рис. 90). Технологическое отверстие диаметром d_0, остающееся после намотки (§ 12), учитывается соответствующим снижением $\kappa_{ок}$ в (77), (89), (98). Однако, если величину d_0 ввести в анализ и непосредственно, то при реальных значениях $\frac{d_0}{a}$ выводы по оптимальной геометрии не меняются.

Оптимальные значения x, y, z для т. м. м. повышенной ча-

стоты всех типов (с медными обмотками), вытекающие из рассмотрения приведенных кривых, сведены в табл. 27 как раздельно для условий минимального объема и минимального веса, так и для единых «компромиссных» условий.

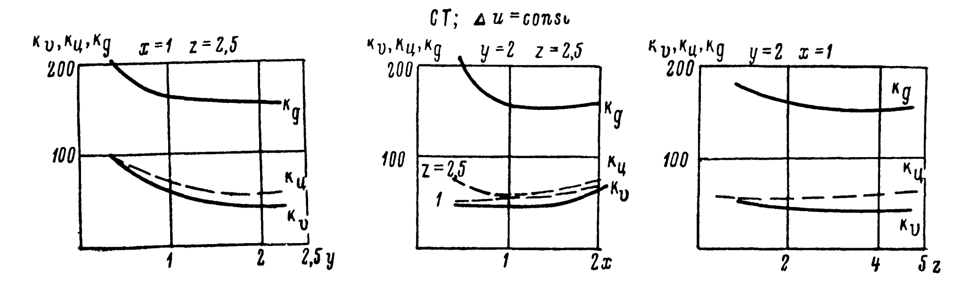


Рис. 98. Зависимость коэффициентов геометрии СТ от геометрии при постоянном падении напряжения.

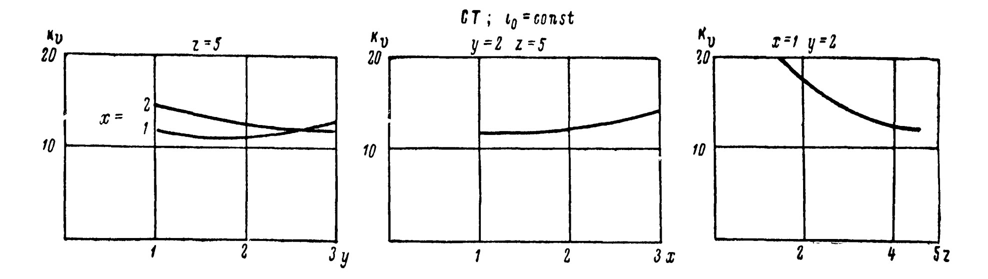


Рис. 99. Зависимость коэффициента геометрии по объему СТ от геометрии при постоянном токе намагничивания.

При замене меди алюминием (см. рис. 95 и 101) оптимальные, x, y, z по объему сохраняются прежними, а по весу меняются: y несколько уменьшается, x, z увеличиваются.

Данные оптимальной геометрии по весу для БТ и СТ с алюминиевыми обмотками приведены в табл. 28.

Отметим, что согласно (77) величины «э» зависят также от параметра φ_ν, в состав которого по (78) входит геометрическая характеристика β. Однако, как показывает соответствующий анализ, вид кривых $\kappa_э \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$ в зависимости от x, y, z мало отличается от кривых $\kappa_э$. Поэтому выводы по оптимальной геометрии остаются неизменными и с учетом этого уточняющего обстоятельства.

Оптимальная геометрия т. м. м.

Трансформаторы			Оптимальная геометрия									Компромиссная геометрия		
Тип	Критерий оптимальности		по весу			по объему			по стоимости					
			x	*y*	*z*	*x*	*y*	*z*	*x*	*y*	*z*	*x*	*y*	*z*
Броневой	По нагреву	Нормальная частота	0,9—1,3	2	2,5—5	0,3—0,5	2	2,5—5	0,3—0,6	2	1—3	0,8	2	2—4
Броневой	По нагреву	Повышенные частоты	0,5—1; 1,5	0,5; 1—2	1,5—4	0,4—0,7	1,5—2	1,5—5	—	—	—	1	1—2	1,5—4
Броневой	По падению напряжения		0,6—1,2	2	1,5—4	0,3—0,8	2	1—3	0,3—0,8	2	1	0,8	2	1—2
Броневой	По току намагничивания		—	—	—	1	2	3—5	—	—	—	—	—	—
Стержневой	По нагреву	Нормальная частота	1,2—2	1,5—2	3—5	0,6—1	2	2,5—5	0,8—1,3	2	2—4	1,2	2	2,5—5
Стержневой	По нагреву	Повышенные частоты	1; 1,5—2,5	0,5; 1—1,5	3—5	0,8—1,2	1—2	2,5—5	—	—	—	1,5	1,5	2,5—5
Стержневой	По падению напряжения		0,8—1,7	1,5—2	2,5—5	0,5—1,5	2	2,5—5	0,5—1,2	2	1—2,5	1—1,2	2	1,7—3,5
Стержневой	По току намагничивания		—	—	—	1—1,5	1,5—2	4—6	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 27

Трансформаторы			Оптимальная геометрия									Компромиссная геометрия		
Тип	Критерий оптимальности		по весу			по объему			по стоимости					
			x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Тороидальный	По нагреву	Нормальная частота	1,7–2,5	2	–	1,5–2	2	–	–	–	–	2	2	–
		Повышенные частоты	2–**4**	0,5–1,5	–	1,5–3	0,8–1,5	–	–	–	–	1,7–3,5	0,6–1,2	–
	По падению напряжения		2–**3**	2	–	–	–	–	–	–	–	2	2	–
Трехфазный	По нагреву	Нормальная частота	**1–1,5**	**1**–1,5	2,5–5	**0,5**–1	1,5–2	2,5–5	–	–	–	1	1,5	2,5–5
		Повышенные частоты	1–2	**0,5**–1	4–**6**	0,5–1	0,5–1	4–**6**	–	–	–	1	1	4–6
	По падению напряжения		1–1,5	1,2–2	2,5–6	0,5–1	1,5–**2**	2,5–6	–	–	–	1	1,5–2	2,5–6

Примечание. Лучшие значения набраны полужирным шрифтом.

Таблица 28

Оптимальная геометрия т. м. м. с алюминиевыми обмотками

Трансформаторы		Оптимальная геометрия по весу		
Тип	Критерий оптимальности	x	y	z
Броневой	По нагреву при повышенных частотах	1; 1,5	0,5; 0,5—1,5	1,5—5
	По падению напряжения	1—1,2	2	2—4
Стержневой	По нагреву при повышенных частотах	**1**; 2; 3	**0,5**; 1; 1—1,5	2,5—**5**
	По падению напряжения	1,5	2	2,5—5

Примечание. Лучшие значения набраны полужирным шрифтом.

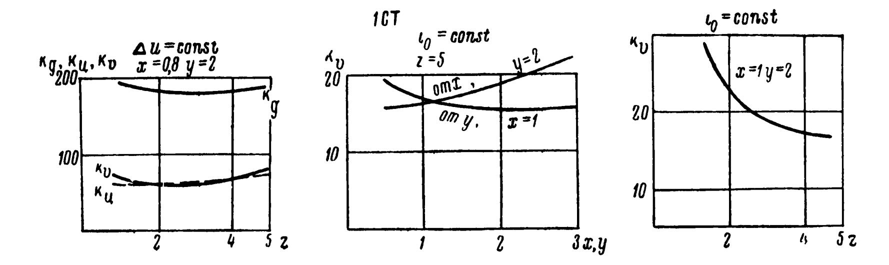


Рис. 100. Зависимость коэффициентов геометрии 1СТ при постоянных падении напряжения и токе намагничивания.

Перейдем к трансформаторам нормальной частоты (также при заданном перегреве). Из рис. 92, 97, 103, 106 следует, что по сравнению со случаем повышенных частот здесь условия минимальных $к_v$ и $к_g$ ближе друг к другу. Приближаются к ним и условия минимального $к_ц$. [Коэффициент геометрии по стоимости $к_ц$ построен при таких соотношениях $\frac{ц_к}{ц_с}$, которые охватывают практически возможные сочетания этих величин.]

В частности, для всех этих условий оптимальна величина $y = 2$. Отсюда следует, что при проектировании т. м. м. нормальной частоты желательно не отступать в сторону $y<2$. Остальные замечания, сделанные ранее, сохраняют силу и здесь. Оптимальные значения x, y, z для этого случая приведены в табл. 27.

Оптимальная геометрия для т. м. м. при заданном падении напряжения характеризуется меньшими по сравнению

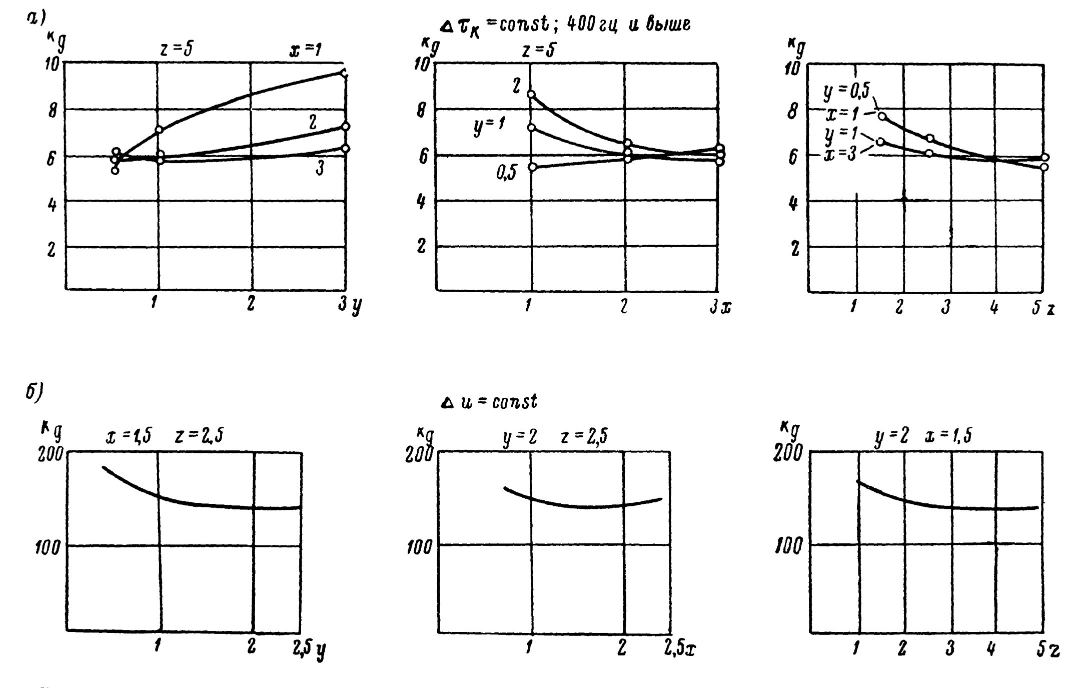


Рис. 101. Зависимость коэффициента геометрии по весу СТ от геометрии при алюминиевых обмотках: *а* — повышенные частоты (при постоянном перегреве); *б* — при постоянном падении напряжения.

с предыдущими случаями значениями x и z и бо́льшими y. Это означает, что для получения наиболее благоприятных условий по величине падения напряжения необходимо уменьшать окно и

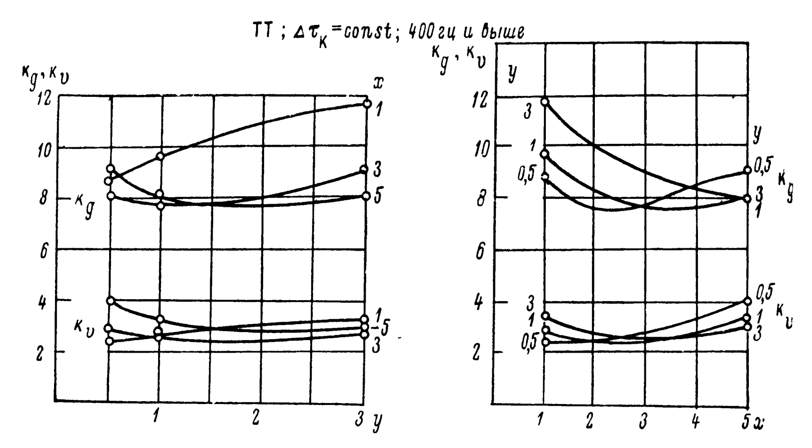


Рис. 102. Зависимость коэффициентов геометрии ТТ от геометрии на повышенных частотах (при постоянном перегреве).

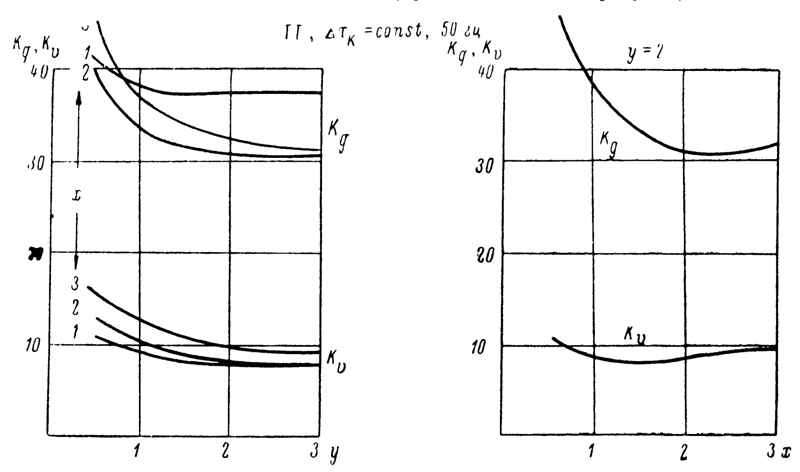


Рис. 103. Зависимость коэффициентов геометрии ТТ от геометрии на нормальной частоте (при постоянном перегреве).

увеличивать сечение сердечника, т. е. увеличивать отношения объемов $\frac{V_с}{V_к}$ и весов $\frac{G_с}{G_к}$ сердечника и катушек. Здесь на показателях трансформаторов, кроме z, мало сказывается изменение параметра x. Оптимальные значения x, y, z приведены в табл. 27.

При алюминиевых обмотках минимум веса достигается при еще большем увеличении x и z, чем это было для трансформато-

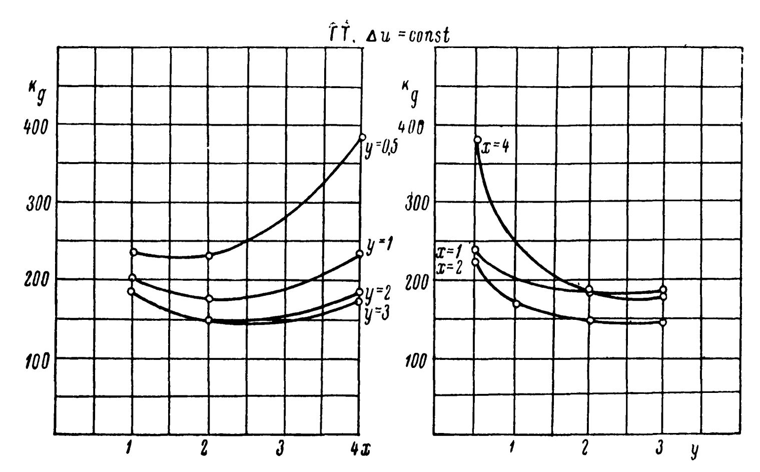


Рис. 104. Зависимость коэффициентов геометрии ТТ от геометрии при постоянном падении напряжения.

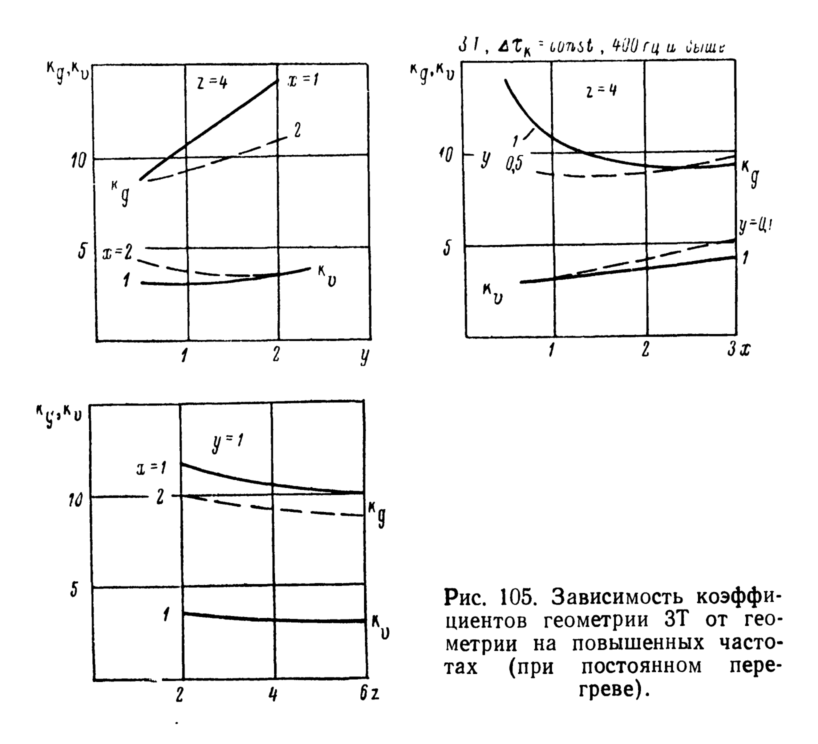


Рис. 105. Зависимость коэффициентов геометрии ЗТ от геометрии на повышенных частотах (при постоянном перегреве).

ров повышенной частоты (см. рис. 95 и 101). Данные оптимальной геометрии по весу для БТ и СТ с алюминиевыми обмотками приведены в табл. 28.

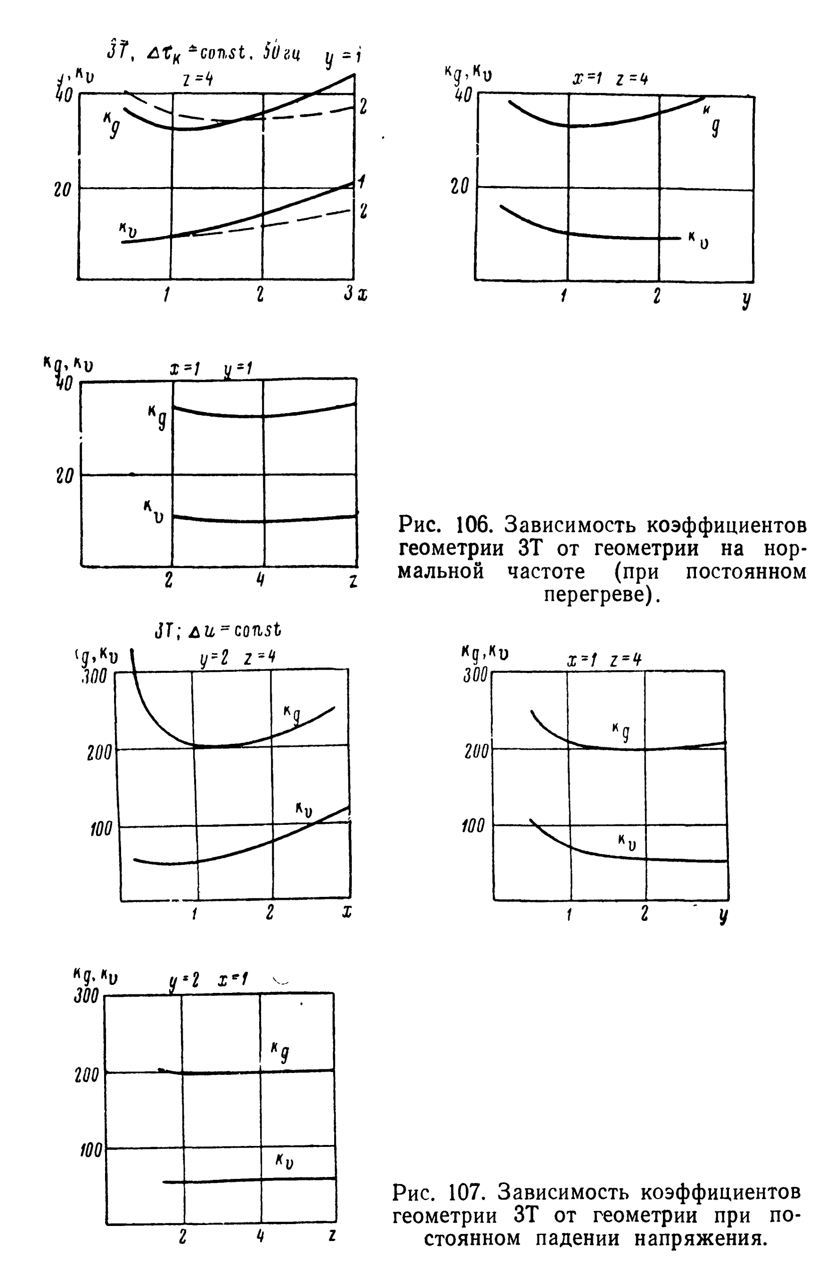


Рис. 106. Зависимость коэффициентов геометрии 3Т от геометрии на нормальной частоте (при постоянном перегреве).

Рис. 107. Зависимость коэффициентов геометрии 3Т от геометрии при постоянном падении напряжения.

Наконец, определим оптимальную геометрию из условия обеспечения минимального тока намагничивания. Легко видеть (см. рис. 94 и 99), что по сравнению со случаем минимального падения напряжения мы сталкиваемся здесь с про-

тивоположными результатами, именно: оптимальному трансформатору соответствуют меньшие y и бо́льшие x и z, т. е. здесь необходимо увеличить окно, уменьшая сечение сердечника. Как видим, условия минимального падения напряжения и минимального тока намагничивания совершенно противоречивы. Оптимальные x, y, z из условий заданного тока намагничивания также приводятся в табл. 27. Практически требование обеспечения минимального Δu играет бо́льшую роль, поэтому обычно геометрия по минимуму тока намагничивания не выбирается.

Если сопоставить оптимальную геометрию для повышенных частот и частоты 50 *гц*, можно видеть, что для всех типов во втором случае трансформатор должен быть толще (увеличение y), а его окно несколько у́же (уменьшение x), т. е. должен уменьшаться объем катушки по сравнению с сердечником. Для трансформаторов минимального падения напряжения необходимо дальнейшее относительное уменьшение размеров катушки, поскольку в этом случае необходимо еще более сужать окно (уменьшить x) и дополнительно уменьшить и высоту окна (параметр z). Оптимальные т. м. м. с алюминиевыми обмотками имеют бо́льшие значения $\frac{s_{ок}}{s_с}$ и $\frac{V_к}{V_с}$, чем при медных обмотках.

Оптимальная геометрия и коэффициенты заполнения $к_{ок}$, $к_с$. Согласно выражениям (128)—(131) и формулам в табл. 26 оптимальная геометрия по объему не зависит, а по весу и стоимости зависит от величин коэффициентов заполнения $к_{ок}$ и $к_с$. Выше были приведены результаты анализа для реально достижимых на практике значений $к_{ок}$ и $к_с$ при условии полного использования окна катушкой. Подобный же анализ, проведенный для различных величин $к_{ок}$ и $к_с$, показывает, что каждому значению $к_{ок}$ и $к_с$ соответствует своя геометрия, оптимальная по весу или стоимости. Но сами абсолютные минимумы веса и стоимости остаются постоянными. Это означает, что при каждой величине $к_{ок}$ можно добиться минимума веса или стоимости соответствующим выбором геометрии трансформатора при соблюдении оптимальной величины $к_с$. Точно так же при каждой величине $к_с$ можно добиться минимума веса, выбирая должным образом геометрию трансформатора и соблюдая оптимальную величину $к_{ок}$. Нельзя, однако, добиться минимума веса или стоимости, выбирая произвольно значения и $к_{ок}$ и $к_с$. С другой стороны, для каждой геометрии существуют оптимальные $к_{ок}$ и $к_с$, обеспечивающие те же минимумы стоимости и веса (см. § 19).

Поэтому стремление к достижению повышенных значений $к_{ок}$ можно было бы считать правомерным лишь с точки зрения получения минимального объема при условии перехода к новой геометрии сердечников. То же относится к величине $к_с$ для т. м. м. повышенной частоты. Как ясно из данных, приведенных в § 19, одновременное максимальное увеличение и $к_{ок}$ и $к_с$ было бы

целесообразно при этом лишь для трансформаторов нормальной частоты и рассчитываемых на заданное падение напряжения. Для трансформаторов повышенной частоты достижение минимума веса или стоимости в случае максимального значения одного из коэффициентов заполнения возможно лишь при соблюдении оптимальной (не максимальной) величины другого коэффициента.

Необходимо отметить также следующее очень важное обстоятельство: можно для данного $к_{ок}$ найти геометрию, оптимальную либо по весу, либо по стоимости. Второй же из этих показателей при максимальном заполнении окна окажется не минимальным. Достижение его минимума может быть осуществлено выбором оптимального заполнения окна согласно рекомендациям, данным в § 19.

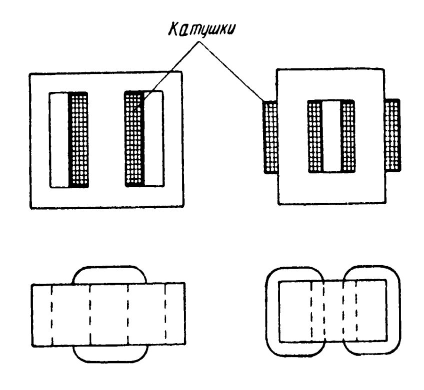


Рис. 108. Броневой и стержневой т. м. м. с неполным заполнением окна катушкой.

Укажем, как практически следует реализовать выводы по выбору оптимальной величины $к_{ок}$. При проектировании трансформатора следует выбрать больший типоразмер сердечника, чем это необходимо для получения заданной мощности при реализации максимально достижимой величины $к_{ок}$. Тогда количество меди можно уменьшить за счет уменьшения либо числа витков, либо сечения проводников, либо того и другого одновременно. При этом окажется, что катушка по ширине окна сердечника займет лишь некоторую его часть вокруг стержня, часть же окна останется свободной (рис. 108). Таким образом, будет иметь место неполное заполнение окна катушкой.

Хотя геометрия такого трансформатора оказывается иной, чем при полном использовании окна, как это принималось в выкладках, принципиальные выводы об оптимальных величинах $к_{ок}$ не изменяются. Более того, как показывает детальный анализ, оптимальные величины $к_{ок}$ еще сильнее уменьшаются, снижение веса и стоимости трансформаторов оказывается для этого случая даже более заметным, а габаритный объем трансформатора в очень многих практических случаях сохраняется прежним или даже уменьшается (т. е. снижение $к_{ок}$ не приводит к росту объема трансформатора). Последнее объясняется тем, что увеличение размеров сердечника компенсируется уменьшением размеров катушки. Открывающиеся при этом для охлаждения участки поверхностей катушки и сердечника и рост α из-за уменьшения толщины катушки улучшают тепловой режим трансформатора.

В силу этих причин т. м. м. с неполным заполнением окна медью могут обладать лучшими показателями, чем трансформаторы с полным заполнением, геометрия которых строго соответствует достигнутой величине $к_{ок}$. Большим достоинством трансформаторов с неполным заполнением окна является возможность достижения практически минимальных веса и стоимости т. м. м. одновременно. Сохранение минимальной стоимости возможно при изменении цен активных материалов без изменения геометрии сердечников. Необходимо подчеркнуть, что использование пониженных значений $к_{ок}$ не исключает желательности возможно более плотной намотки катушек с целью уменьшения средней длины витка.

В заключение отметим, что вопросы геометрии и выбора коэффициентов заполнения тесно связаны с принципами построения рядов сердечников (см. § 21).

Заключительные замечания. Как видно из проведенного анализа, невозможно создать трансформатор, геометрия которого была бы оптимальной и по нагреву, и по падению напряжения, и по току намагничивания. Более того, даже с точки зрения нагрева трансформатор не может быть оптимальным одновременно и для частоты 50 *гц* и для повышенных частот. Часто не совпадают также условия минимального веса, объема, стоимости. Различна оптимальная геометрия для т. м. м. с медными и алюминиевыми обмотками. Поэтому для каждого из этих случаев, строго говоря, должна выбираться своя геометрия. Однако обычно такое решение практически неприемлемо. Действительно, т. м. м. проектируют, как правило, на стандартных сердечниках, составляющих унифицированные ряды типоразмеров. Поэтому, выбирая геометрию т. м. м., либо обращаются к некоторой компромиссной геометрии, либо создают раздельно трансформаторы минимального веса (геометрия которых оптимальна по весу) и трансформаторы минимальной стоимости. Первые находят применение в специальной технике, транспортных установках и т. д., вторые — в условиях массового производства, особенно для изделий народного потребления. Трансформаторы минимальной стоимости проектируют обычно для частоты 50 *гц*. В принципе могут быть созданы и трансформаторы минимального объема.

Если поставить вопрос, для каких условий расчета выбирается оптимальная геометрия, то решается он следующим образом: сердечникам меньших типоразмеров придается геометрия, оптимальная по условиям падения напряжения, бóльших типоразмеров — по условиям нагрева, при этом либо принимают компромиссный вариант между нормальной и повышенной частотами, либо отдается предпочтение тому или другому случаю в зависимости от назначения трансформаторов. Как ясно из выводов, приведенных в § 15, точной границы между «бóльшими» и «меньшими» типоразмерами проведено быть не может.

Таблица 29

Оптимальные соотношения весов, объемов и сечений $\frac{G_с}{G_к}, \frac{V_с}{V_к}, \frac{s_{ок}}{s_с}$

Трансформаторы: Тип		Критерий оптимальности	При оптимальной геометрии: по весу $\frac{G_с}{G_к}$	по весу $\frac{V_с}{V_к}$	по весу $\frac{s_{ок}}{s_с}$	по объему $\frac{G_с}{G_к}$	по объему $\frac{V_с}{V_к}$	по объему $\frac{s_{ок}}{s_с}$	по стоимости $\frac{G_с}{G_к}$	по стоимости $\frac{V_с}{V_к}$	по стоимости $\frac{s_{ок}}{s_с}$	При компромиссной геометрии $\frac{G_с}{G_к}$	$\frac{V_с}{V_к}$	$\frac{s_{ок}}{s_с}$
Броневой	По нагреву	Нормальная частота	1,2–2	0,5–0,8	1,2–3	3,5–4,5	1,4–1,7	0,6–1,3	4–7	1,5–2,7	0,3–0,8	2–2,8	0,8–1,1	0,8–1,6
		Повышенные частоты	0,7–2	0,3–0,8	1–8	2–5	0,8–2	0,4–2,2	—	—	—	1–2,5	0,4–1	0,8–4
		То же при алюминиевых обмотках	0,5–2,4	0,1–0,6	1,5–15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	По падению напряжения		2,5–5	0,6–1,3	0,5–2	6–10	1,5–2,5	0,3–0,8	10	2,7	0,3	4–6	1–1,5	0,4–0,8
	То же при алюминиевых обмотках		3,2–5,5	0,5–0,9	1–2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Стержневой	По нагреву	Нормальная частота	0,8–2,2	0,3–0,9	1,8–7	2–3	0,8–1,2	1,3–2,5	1,5–3,3	0,6–1,3	1–3	1,8–2,5	0,7–1	1,5–3
		Повышенные частоты	0,4–1,5	0,15–0,6	4,5–15	1,5–3	0,6–1,2	1,3–5	—	—	—	1,2–1,7	0,5–0,7	2,5–5
		То же при алюминиевых обмотках	0,6–2	0,15–0,5	5–15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	По падению напряжения		1,6–3,9	0,4–1	1,5–6	2–9	0,5–2,3	0,6–3,8	4–16	1–4	0,3–1,3	3–6	0,8–1,5	0,8–2
	То же при алюминиевых обмотках		3,7–5	0,6–0,8	2–4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Тороидальный	По нагреву	Нормальная частота	1,2–2,3	0,5–0,9	1,2–2,5	1,7–2,5	0,7–1	0,9–1,6	—	—	—	1,7	0,7	1,6
		Повышенные частоты	0,5–0,7	0,2–0,25	8–11	0,7–1,5	0,3–0,6	3–6	—	—	—	0,5–1	0,2–0,4	5–10
	По падению напряжения		1,4–2,6	0,4–0,7	1,5–3,5	—	—	—	—	—	—	2,6	0,7	1,6
Трехфазный	По нагреву	Нормальная частота	1–2,7	0,4–1,1	0,8–4	2–6	0,8–2,5	0,3–1,7	—	—	—	2–2,7	0,7–1	0,8–1,7
		Повышенные частоты	0,4–1,6	0,15–0,7	2–12	1–3,5	0,4–1,5	1–6	—	—	—	1,5–1,7	0,6–0,7	2–3
	По падению напряжения		1,7–4,8	0,15–1,3	0,6–4	3–9	0,8–2,5	0,3–2	—	—	—	2,7–4,8	0,7–1,2	0,6–2

Примечание. При пониженных (оптимальных) значениях $k_{ок}$ соотношение $\frac{G_с}{G_к}$ при расчете по нагреву может возрасти.

Поэтому может быть целесообразным создание средних групп типоразмеров в двух вариантах оптимальной геометрии — по нагреву и падению напряжения.

При широком внедрении т. м. м. с алюминиевыми обмотками, возможно, окажется рациональной разработка для них новых типоразмеров соответствующей геометрии. Оптимальная геометрия трансформаторов на высокие перегревы соответствует либо случаю трансформаторов нормальной частоты, если величина Δu не оговаривается, либо, если эта величина задается,— случаю трансформаторов с минимальным падением напряжения.

Рассмотрим вопрос о важных соотношениях сечений окна и сердечника $\frac{s_{ок}}{s_с}$, объемов и весов сердечника и катушек $\frac{V_с}{V_к}$ и $\frac{G_с}{G_к}$. Иногда одним из этих соотношений стремятся определить оптимальную геометрию. Однако легко убедиться, что различным рассмотренным случаям будут соответствовать самые различные величины этих соотношений.

Полагая по табл. 26, что

$$\frac{s_{ок}}{s_с} = \frac{\varphi_{ок}}{\varphi_s}, \quad \frac{V_с}{V_к} = \frac{\varphi_с}{\varphi_к}, \quad \frac{G_с}{G_к} = \frac{\gamma_с \kappa_с \varphi_с}{\gamma_к \kappa_{ок} \varphi_к},$$

подсчитаем при оптимальных x, y, z оптимальные значения этих соотношений. Результаты подсчета приведены в табл. 29. Из этой таблицы следует, что все рассмотренные соотношения лежат в очень широких пределах в зависимости от конкретных условий.

§ 21. РЯДЫ СЕРДЕЧНИКОВ ДЛЯ Т. М. М.

Основу трансформатора составляет его магнитопровод (сердечник). Поэтому в целях унификации прежде всего стандартизируют размеры сердечников. Эти размеры должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить выполнение трансформаторов в заданном диапазоне мощностей. Связь между размерами магнитопровода и мощностью трансформатора устанавливается выражением (11). Если в первом приближении принять, что все прочие величины в (11) постоянны, то получим, имея в виду обычный случай полного использования окна катушкой,

$$P \equiv s_с s_{ок} \equiv abch \equiv xyza^4. \qquad (132)$$

К ряду сердечников предъявляется требование: обеспечить определенный шаг — коэффициент κ_p — нарастания мощности трансформатора P при переходе от сердечника к сердечнику. Для т. м. м. принимают обычно $\kappa_p = 1{,}25$. Следовательно, по (132) необходимо обеспечить рост произведения $s_с s_{ок}$ в 1,25 при переходе к каждому последующему сердечнику. Этот рост может быть обеспечен либо за счет увеличения сечения сердечника $s_с$, либо площади окна $s_{ок}$, либо той и другой величины одновре-

менно. Соотношение между $s_с$ и $s_{ок}$ желательно иметь оптимальным (см. табл. 29).

Практически одновременное увеличение $s_с$ и $s_{ок}$ является неприемлемым. Это означало бы, что от сердечника к сердечнику менялись бы все их размеры и каждый типоразмер требовал бы для своего изготовления новых заготовок магнитного материала, нового комплекта технологической оснастки и новых элементов конструкции трансформатора. Поэтому весь ряд сердечников разбивают на несколько групп. Внутри каждой группы сохраняются неизменными все размеры сердечника, кроме одного, и в зависимости от выбранного переменного размера может меняться величина либо $s_с$, либо $s_{ок}$. Между группами могут меняться все размеры сердечника. Таким путем удается для сердечников одной группы унифицировать некоторые виды оснастки и элементов конструкции.

Соотношения размеров всех сердечников должны обеспечить максимальное приближение к условиям оптимальной геометрии. Число сердечников в группе $n_с$ можно определить, исходя из допустимого по условиям оптимальной геометрии диапазона изменений l' одного из рамеров — a, b, c, h (т. е. изменений x, y, z).

Учитывая (132), легко получить

$$к_p^{n_с-1} = l',$$

откуда

$$n_с = \frac{\lg l'}{\lg к_p} + 1.$$

Согласно выводам в § 20 $l' \approx 1{,}5—2{,}5$ и при $к_p = 1{,}25$ $n_с \approx 4$.

Рассмотрим раздельно ряды наборных штампованных и ленточных сердечников (для т. м. м. с медными обмотками).

Штампованные наборные сердечники. При штамповке пластин удобно набирать из них пакеты, различные по толщине b (см. рис. 1 и 90). Поэтому здесь рациональным способом является изменение внутри группы величины $s_с = ab$ при $a = \text{const}$. Это позволяет на все сердечники данной группы иметь один штамп, хотя и не обеспечивает сохранение оптимальной геометрии (см. табл. 27).

Нормализованные типоразмеры броневых сердечников, принятые в промышленности для трансформаторов наименьшего веса (нормаль НО.666.000) и наименьшей стоимости (нормаль НИО.010.005), приведены в § 27 (см. табл. 35—37).* СТ и ТТ на штампованных наборных сердечниках широкого применения не находят. Сердечники обеспечивают следующий диапазон мощностей трансформаторов при нормальных перегревах (ориентировочно): по табл. 35 — от 1,5 до 1000 *ва* на частоте 50 *гц* и от

* Упоминаемые в данном параграфе, но не приведенные еще таблицы см. в § 27.

15 до 3200 *ва* при частоте 400 *гц*; по табл. 37 от 1 до 300 *ва* при частоте 50 *гц*. Точные значения предельных мощностей, как и мощностей каждого типоразмера, зависят от многих факторов (см. § 18 и 26).

Сердечники по НО.666.000 делятся на два раздела: основной (см. табл. 35) и дополнительный (см. табл. 36) с «низким окном» (для высоковольтных трансформаторов). Геометрия сердечников характеризуется параметрами: $x = 1$; $y = 0{,}6—2{,}5$; $z = 2{,}5$ (для дополнительного раздела — $z = 1{,}5$).

Сопоставляя эти значения с данными табл. 27 (имея в виду вес и объем одновременно), можно сказать, что сердечники ряда для трансформаторов с заданным перегревом повышенной частоты относительно оптимальны при $y = 1—2$; в случае частоты 50 *гц* — при $y \geqslant 1{,}6$. Для трансформаторов с заданным падением напряжения сердечники имеют слишком широкое и несколько высокое окно (велики x и z), а значения y оптимальны только в пределах $y \geqslant 1{,}6$. Поэтому можно рекомендовать при повышенных частотах применять только наборы при $y = 1—2$, при нормальной частоте — только большие наборы ($y \geqslant 1{,}25$), при заданном падении напряжения — сердечники с «низким окном» ($z = 1{,}5$) и с большими наборами ($y \geqslant 1{,}6$).

Сердечники по табл. 37 обеспечивают минимальную стоимость трансформатора для всех случаев расчета, но только при больших наборах ($y = 1{,}5$ и 2). Сердечники со значениями $y = 1$ неоптимальны.

Отметим следующие свойства рядов с вариацией толщины набора b. С переходом от типоразмера к соседнему большему типоразмеру трансформатора намагничивающий ток i_0 внутри группы остается постоянным (при постоянной индукции), а при переходе к следующей группе — уменьшается; падение же напряжения Δu (при постоянной плотности тока) внутри группы падает, а при переходе к следующей группе скачком возрастает по сравнению с наибольшим типоразмером предыдущей группы (оставаясь меньше, чем у наименьшего типоразмера предыдущей группы).

Ленточные сердечники. Ленточные сердечники применяются для БТ, СТ, ТТ и ЗТ. В обозначения Ш, П, О, Е типов ленточных сердечников добавляется буква Л: ШЛ, ПЛ, ОЛ, ЕЛ. При этом типоразмеры ШЛ-сердечников для БТ во многом совпадают с типоразмерами наборных штампованных сердечников Ш по табл. 35. Это объясняется стремлением сохранить при переходе к ленточным сердечникам известную преемственность, хотя при этом и не обеспечивается соблюдение оптимальной геометрии.

Ряд нормализованных броневых разъемных ленточных сердечников приведен в табл. 38, § 27. Диапазон мощностей трансформаторов, охватываемых сердечниками при нормальных перегревах и применении холоднокатаной стали,—

от 1 до 1200 *ва* при частоте 50 *гц* и от 5 до 3400 *ва* при частоте 400 *гц* (ориентировочно). Параметры геометрии: $x = 1$, $y = 1—2$, $z = 2{,}5$. Относительно оптимальности этой геометрии по весу и объему говорилось выше в настоящем параграфе. С точки зрения стоимости сердечники имеют слишком широкие окна (x) и в большинстве своем малые значения y.

Учитывая, что сохранение размеров окна внутри группы ряда для разъемных ленточных сердечников не вызывается технологической необходимостью, здесь не является обязательной вариация размера b. Как было показано в § 20, оптимальная геометрия сердечников для БТ и СТ сохраняется при широких вариациях величины z. Это приводит к новому принципу построения группы ряда — изменению высоты окна h при всех прочих постоянных размерах. Такой принцип хорошо увязывается также с технологией изготовления разъемных сердечников методом штамповки и гибки ленты (см. § 9), когда на всю группу сердечников может быть использована одна и та же оснастка. При соответствующем выборе размеров возможна также сборка n_c сердечников из (n_c —2) стандартных половинок. Унифицируются при этом также основания трансформаторов.

Таким образом, для разъемных ленточных сердечников внутри группы наиболее рационально менять не s_c, а $s_{ок} = ch$ путем изменения h при $c = \text{const}$.

Для разъемных ленточных сердечников может быть реализовано построение группы ряда с изменением ширины окна сердечника (параметра x), что особенно целесообразно для трансформаторов с заданным падением напряжения. Если для штампованных наборных сердечников этот принцип вступает в противоречие с технологией изготовления пластин, то здесь такого противоречия нет (хотя нет и технологических преимуществ, как при вариации высоты окна).

Оптимальный ряд ПЛ-сердечников для стержневых трансформаторов, построенный по такому принципу, приводится в табл. 39. Ряд охватывает широкий диапазон мощностей трансформаторов — от 1 до 3500 *ва* при частоте 50 *гц* и от 10 до 9000 *ва* при частоте 400 *гц*. Данный ряд сердечников максимально использует ряды предпочтительных чисел по ГОСТ 8032—56. Он состоит из 10 групп.

Геометрия сердечников первых двух групп выбрана оптимальной из условия падения напряжения: $x = 1{,}25$; $y \geqslant 1{,}6$; $z = 1{,}25—3{,}2$. Геометрия сердечников III—IV групп оптимальна по весу и объему для т. м. м. повышенной частоты: $x = 1{,}25$; $y = 1{,}25$; $z = 2—4$. Наконец, сердечники V—X групп ($x = 1{,}6$; $y = 2$; $z = 2{,}5—5$) оптимальны по всем показателям при частоте 50 *гц* (при расчете на заданный перегрев) и по объему и стоимости при повышенных частотах (по весу здесь может иметь место проигрыш до 5—10%).

Такая разбивка ряда по зонам геометрии соответствует реальному сочетанию предъявляемых к т. м. м. требований с величинами их мощности (см. § 15) в большинстве практических случаев при одновременном учете большей применяемости малых типоразмеров на повышенных частотах и наоборот.

Поэтому ряд по табл. 39 можно считать единым оптимальным рядом для стержневых трансформаторов. Этот ряд также является междуведомственной нормалью СССР (нормаль НО.666.002). На сердечниках этого ряда созданы, в частности, галетные трансформаторы (см. § 4, рис. 28). Сердечники средней части ряда могут оказаться неоптимальными по стоимости для трансформаторов на частоту 50 *гц* при малых допустимых падениях напряжения. Для этих случаев окно должно быть сужено (уменьшен x). Однако при алюминиевых обмотках ряд оптимален и здесь. Из сердечников ряда можно составлять и броневые сердечники, причем их геометрия будет близка к оптимальной.

Особенностями ряда с вариацией высоты окна является постоянство величины Δu внутри группы и уменьшение ее при переходе к большему типоразмеру соседней группы, а также уменьшение намагничивающего тока i_0 с переходом к большему типоразмеру внутри группы и его возрастание с переходом к следующей группе ряда (до величины, однако, меньшей, чем у наименьшего типоразмера предыдущей группы).

Нормализованный ряд тороидальных ленточных сердечников приведен в § 27, табл. 40. Ряд построен с вариацией размера b. Он охватывает мощности трансформаторов от 0,1 до 700 *ва* при частоте 50 *гц* и от 1 до 2000 *ва* при частоте 400 *гц*. Для трансформаторов нормальной частоты оптимальны высокие сердечники каждой группы (большие y).

Принятый ряд трехфазных разъемных ленточных сердечников приведен также в § 27, табл. 41. Здесь применен оптимальный принцип вариации высоты окна h. Геометрия сердечников ориентирована на использование при повышенных частотах. Диапазон мощностей трансформаторов на этих сердечниках при частоте 400 *гц* — от 20 до 4000 *ва*.

Помимо рассмотренных рядов создается также ряд разъемных ленточных сердечников для трансформаторов минимальной стоимости. Малые сердечники ряда — броневого типа, большие — стержневого. Граничная мощность между ними —30—40 *ва*.

Построение рядов и роль коэффициента заполнения $k_{ок}$. Как уже отмечалось, любой ряд, будучи оптимальным (или приближаясь к оптимальному) в части одних экономических показателей, не оптимален в части других из них. Это положение усугубляется вариацией того или иного размера внутри группы ряда, вследствие чего может иметь место дополнительное отклонение от условий оптимальной геометрии.

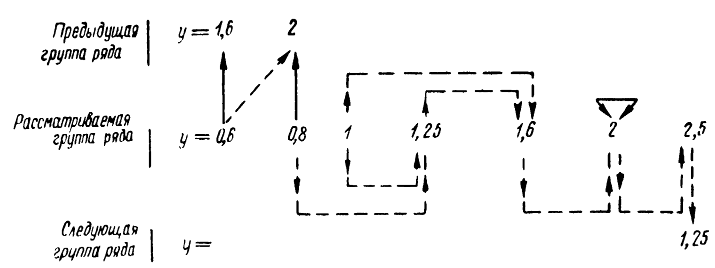
Весьма эффективным средством уменьшения стоимости трансформатора при практическом сохранении веса и объема является осуществление оптимального (неполного) заполнения окна медью согласно рекомендациям в § 19 и 20 при соответствующем выборе типоразмера из ряда сердечников. Этот метод эффективен для всех нормализованных рядов (см. табл. 35—41) и для всех условий расчета (заданный перегрев, частота 50 *гц*, частота 400 *гц*, заданное падение напряжения). Метод применяется следующим образом:

1. Для рядов с вариацией в группе толщины сердечника (параметра y) — ряды по табл. 35, 36, 38, 40. Для проектирования трансформаторов используются только типоразмеры с величинами $y = 1{,}25—2$.

Для ряда по табл. 37 оставляются сердечники с параметрами $y = 1{,}5$ и $y = 2$.

Трансформаторы, которые при полном заполнении окна проектировались на типоразмерах с толщинами сердечника $y = 0{,}6—1{,}6$, проектируются теперь на оставленных типоразмерах с соответственно большими толщинами сердечника той же или предыдущей группы ряда (с типоразмера $y = 2{,}5$ ряда по табл. 35 переход осуществляется к типоразмеру $y = 1{,}25$ следующей группы ряда). Габариты и веса таких трансформаторов практически сохраняются или даже снижаются, а количество расходуемой дефицитной меди и суммарная стоимость трансформатора заметно снижаются (на 15—50%).

Переход к новым типоразмерам осуществляется в соответствии со следующей схемой:



Пунктиром обозначены переходы, осуществляемые с уменьшением коэффициента заполнения $к_{ок}$, сплошной линией — с сохранением полного заполнения окна медью. В случаях, где указано два варианта перехода, переход с понижением величины $к_{ок}$ обеспечивает меньшую стоимость при незначительно увеличенных весе и габаритах по сравнению с переходом при полном использовании окна.

Если вес трансформатора интереса не представляет, то рационален переход к сердечнику с толщиной $y = 2$ ($y = 1{,}6$) для большинства типоразмеров, в свою очередь, от сердечника при

$y = 2$ целесообразно перейти к сердечнику следующей группы ряда с параметром $y = 1,6$. Это обеспечит снижение стоимости трансформаторов, особенно при нормальной частоте.

Для ряда наименьшей стоимости по табл. 37 переходы осуществляются только внутри группы с понижением величины $к_{ок}$ от $y = 1$ к $y = 1,5$, а от $y = 1,5$ к $y = 2$. Для этого ряда таким путем достигается экономия меди и, если осуществляется безотходная штамповка, снижение стоимости трансформаторов. Суммарный вес их возрастает. Трансформатор с пакетом стали $y = 2$ выполняется обычным образом.

2. Для рядов с вариацией в группе высоты окна (параметра z) — ряды по табл. 39 и 41.

При сохранении заданного перегрева трансформаторы проектируют на сердечниках с увеличенной высотой окна по сравнению с трансформаторами, в которых окно полностью занято катушками. Для СТ возможен переход к соседнему по высоте типоразмеру и через один типоразмер, для ЗТ в пределах данной группы эффективен переход от любого типоразмера к сердечнику с максимальной высотой окна. Трансформаторы, проектируемые обычно на самых высоких сердечниках группы ($z \geqslant 3,5$), могут переводиться на вторые по высоте ($z = 3,2$ для СТ; $z = 2,4$ для ЗТ) сердечники следующей группы ряда (с бо́льшей шириной стержня a). Следовательно, в одной группе каждого ряда можно оставить не более двух сердечников.

При сохранении падения напряжения переход к новым типоразмерам внутри данной группы нерационален.

Переход к СТ и ЗТ с неполным заполнением окна обеспечивает значительную экономию меди и снижение стоимости без увеличения, как правило, веса и габаритных объемов трансформаторов. Более того, у ЗТ вес и объем могут быть существенно уменьшены.

* * *

Таким образом, используя метод оптимальных коэффициентов заполнения (неполного заполнения окна), можно при сохранении весов и габаритов трансформаторов добиться значительного снижения расхода меди и стоимости трансформаторов при одновременном серьезном сокращении числа типоразмеров сердечников в рядах, т. е. проведении дополнительной унификации сердечников. Соответствующее рассмотрение показывает, что, используя метод оптимальных коэффициентов $к_{ок}$, можно получить трансформаторы минимальной стоимости, не создавая специального ряда, а опираясь на существующие ряды сердечников для трансформаторов наименьшего веса. Особенно это относится к случаю ленточных сердечников. Таким путем унификация сердечников может быть доведена до максимума.

Очевидно, что описанные преимущества обеспечат при их использовании существенный экономический эффект. Поэтому

изложенные принципы необходимо всемерно внедрять в практику проектирования т. м. м. Заметим, что достигаемый относительный выигрыш тем больше, чем больше мощность проектируемого трансформатора и выше цена меди по отношению к цене стали.

Дополнительный выигрыш при проектировании трансформаторов на заданное падение напряжения может быть получен переходом к вариации размеров ленточных сердечников по ширине окна. Однако при этом пропадают отмеченные выше дополнительные возможности унификации сердечников.

§ 22. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ КАЧЕСТВА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ Т. М. М.

Сравнение однофазных трансформаторов различных типов — броневых БТ, стержневых СТ и тороидальных ТТ — должно быть произведено по нескольким признакам — весовым и габаритным показателям, технологичности, сложности конструирования, стоимости и т. д. Интересно также сопоставить между собой по весам и габаритам однофазные и трехфазные т. м. м.

Сравнение по весам и габаритам (объему) легко сделать на основе теоретических выводов, приведенных в § 18. Для этого достаточно сопоставить для трансформаторов разных типов значения удельных экономических показателей, выражаемых формулами (81), (94), (101), (104), в которых значения $к_э$ берутся по (128)—(131). Все условия сопоставления должны быть выбраны равными — равный перегрев или равные падения напряжения, одинаковые материалы и т. д.

Однофазные трансформаторы. Начнем со сравнения весов и габаритов трансформаторов повышенной частоты. Какие из величин, входящих в формулу (81), различны для различных типов трансформаторов? Прежде всего член $к_э \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$, зависящий по (128), (78), (45) и табл. 26 от геометрии трансформатора и режима его работы. Очевидно, для сравнения необходимо выбрать оптимальные трансформаторы каждого типа, т. е. трансформаторы оптимальной геометрии, работающие в оптимальном режиме [$\nu=\nu_0$ по (106)]. Затем коэффициент заполнения окна $к_{ок}$ (имеется в виду обычное исполнение с полным использованием окна). Поскольку у СТ в окне размещаются две катушки, требующие больше места для изоляции, $к_{ок}$ для него на 5—10% ниже, чем у БТ (исключая малые трансформаторы, где разница больше). В свою очередь, у ТТ $к_{ок}$ на 10—15% ниже, чем у СТ по технологическим причинам (см. § 12). Далее, не одинаковы коэффициенты теплоотдачи (см. § 16). При равной мощности $\alpha_к$ у БТ ниже на 15—20%, а у ТТ — примерно на 10%, чем у СТ.

При использовании штампованных сердечников все прочие величины одинаковы для всех типов трансформаторов. При использовании ленточных сердечников СТ и БТ выполняются обычно

на разъемных, а ТТ — на замкнутых сердечниках. Поэтому здесь следует различными принять еще величины удельных потерь p_{10}, поскольку для разъемных сердечников они в $к_{раз}$ раз выше, чем для тороидальных (см. § 11). Для частот 400—1000 *гц* по табл. 16 $к_{раз}=1,1—1,25$ (сердечники из стали).

Учтя эти замечания, подсчитав $к_э \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$ и „э" по (81), получим, что из трансформаторов на штампованных сердечниках наименьшими весами и габаритами обладает стержневой трансформатор. По сравнению с ним примерно на 10% бо́льшие веса и габариты имеет тороидальный трансформатор и на 20—30% — броневой. Если трансформаторы выполняются на ленточных сердечниках, тороидальный и стержневой трансформаторы имеют практически одинаковые показатели; показатели броневого на те же 20—30% хуже.

Аналогичным путем по формулам (94) и (129) можно получить, что при нормальной частоте питания СТ и ТТ также близки друг к другу, а БТ имеет бо́льшие веса и габариты примерно на 15—25%.

То же касается и стоимости затраченных активных материалов. Отмеченные преимущества стержневых трансформаторов весьма существенны. Они имеют особое значение для т. м. м. средних и больших мощностей, когда вес, габариты и стоимости материалов приобретают первостепенное значение.

Значения v и g по (81) и (94) для трансформаторов на ленточных сердечниках из холоднокатаной стали оптимальной геометрии по весу и объему (см. табл. 27) при частотах 50 и 400 *гц* и перегреве 50° приведены в табл. 30. Принято: $B_0=15\,500$ *гс*, $i_0=0,5$, $P=100$ *ва* (для частоты 50 *гц*), $к_c=0,9$, обмотки — медные; для СТ $к_{ок}=0,3$, $\alpha_к=1,1\times10^{-3}$ *вт/см²·°С*, $p_{10}=11$ *вт/кг* (см. табл. 17). Для БТ и ТТ последняя группа величин скорректирована в соответствии со сказанным выше.

Если сравнить БТ, СТ и ТТ, использующие реальные ряды сердечников, то выигрыш СТ несколько увеличится, поскольку ряд ПЛ-сердечников в большей мере удовлетворяет условиям оптимальной геометрии, чем ряды Ш, ШЛ и ОЛ (см. § 21).

Отметим, что у ТТ с ростом размеров заметно растет перепад температуры по толщине катушки из-за отсутствия торцов, что приводит к более существенному снижению результирующего $\alpha_к$ по сравнению с БТ и СТ. Поэтому при мощностях свыше 300—500 *ва* на частоте 400 *гц* значения v и g увеличиваются и показатели ТТ по весу и объему ухудшаются.

Иные результаты по сравнению различных типов т. м. м. получаются при одинаковом падении напряжения Δu. Здесь СТ и ТТ по-прежнему практически равноценны, но БТ выигрывают по отношению к ним до 10% по объему и стоимости материалов. Значения v и g по (101) при оптимальной геометрии приведены

Таблица 30

Удельные веса и объемы однофазных т. м. м. оптимальной геометрии

Оптимальность геометрии	Тип трансформатора	$\Delta\tau_к=50°$				$\Delta u=0,05$	
		400 *гц*		50 *гц*		50 *гц*	
		v, *см³/ва*	*g*, *г/ва*	*v*, *см³/ва*	*g*, *г/ва*	*v*, *см³/ва*	*g*, *г/ва*
По объему или весу	Броневой	0,82	3,1	3,5	14,9	5	19,5
	Стержневой	0,8	2,4	3,1	11,9	5,9	20
	Тороидальный	0,84	2,5	3,7	13,3	5,7	19
Компромиссная	Броневой	1,05	3,3	4	15,4	5,4	20
	Стержневой	0,85	2,6	3,3	11,9	5,9	20
	Тороидальный	0,91	2,6	3,9	13,6	5,8	19,5

в табл. 30 для частоты 50 *гц* и $\Delta u=0{,}05$. Принято: $\kappa_c=0{,}9$; $B=17\,000$ *гс*; $P=100$ *ва*; $\kappa_{ок}$ для СТ — 0,2. При использовании же существующих рядов сердечников показатели БТ и ТТ при малых y значительно ухудшаются (в 1,5—2 раза), а у СТ в пределах всей группы ряда меняются мало.

Если рассмотреть однокатушечный стержневой трансформатор, то оказывается, что во всех случаях он существенно проигрывает в отношении и броневых, и тороидальных, и стержневых двухкатушечных трансформаторов.

Рассмотрим теперь некоторые электрические характеристики трансформаторов.

С точки зрения величины тока намагничивания i_0 наилучшими показателями обладает ТТ, затем — СТ. При равной мощности трансформатора и примерно равных индукциях ток i_0 у ТТ примерно в 1,5—2,2 раза меньше, чем у СТ на повышенных частотах, и примерно в 1,1—1,3 раза на частоте 50 *гц*. У БТ намагничивающий ток в 1,2—1,5 раза больше, чем у СТ.

Из иных характеристик важное значение для т. м. м. часто имеют внешнее рассеяние и восприимчивость к внешним магнитным полям. Лучшим по этим показателям является, разумеется, ТТ (при соблюдении равномерности намотки обмоток вдоль сердечника), немного уступает ему СТ (при правильном расположении катушек). Данные БТ значительно хуже. Малое рассеяние СТ объясняется меньшей толщиной катушки, чем у БТ, половинным числом витков на каждом стержне [см. (21)] и нахождением стыков (зазоров) внутри катушки, а малое влияние

внешних полей — взаимной компенсацией э. д. с., наведенных в двух катушках. Подчеркнем, что при расположении первичной обмотки на одном стержне, а вторичных — на другом рассеяние у СТ вырастает во много раз. С точки зрения собственной емкости обмоток ТТ имеет наихудшие данные. Емкость растет также у БТ и СТ с галетными обмотками из фольги.

О величине к. п. д. для различных трансформаторов говорится ниже, в § 24.

Сопоставление отдельных типов по ряду конструктивных признаков было проведено в § 4. Дополнительно можно отметить, что у БТ по сравнению с СТ получается меньше выводов при том же числе обмоток, ибо первичная обмотка СТ всегда должна распределяться двумя равными частями между стержнями магнитопровода. Поэтому в ряде случаев у СТ могут возникнуть затруднения с размещением выводов. С другой стороны, когда речь идет о разъемных ленточных сердечниках, проявляются преимущества СТ — здесь проще обеспечить малый зазор в сердечнике и стянуть две его половинки.

Наличие конструктивных элементов у трансформаторов увеличивает их вес и объем против теоретических величин „э" по (81), (94), (101), особенно при малых мощностях. Поскольку меньше всего этих элементов у ТТ, его вес и габариты вырастают менее, чем у БТ и СТ, и приведенные выше цифры сопоставления этих типов необходимо скорректировать дополнительно на несколько процентов в пользу ТТ.

Перейдем теперь к технологичности различных типов трансформаторов. Наименее технологичным является ТТ. Он имеет два очень существенных недостатка: необходимость последовательного изготовления сердечника и катушек, что удлиняет цикл производства, и низкую производительность при намотке катушек (см. § 12). При этом станки тороидальной намотки значительно сложнее и дороже, чем обычные станки рядовой намотки, и могут использоваться лишь для намотки проводов, диаметр которых не превышает 0,7—2 *мм*. Последнее обстоятельство ограничивает возможность применения ТТ при мощностях выше 200—400 *ва*, если исключить ручную намотку катушек. Трудно применить ТТ также и при очень малых мощностях, когда окно сердечника оказывается недостаточным для прохода челнока. Затруднительность намотки ТТ особенно сказывается при частоте 50 *гц*, когда число витков катушек весьма велико.

Если говорить о т. м. м. на штампованных сердечниках, то самым технологичным должен быть признан БТ. По сравнению с СТ он имеет те достоинства, что требует лишь одну катушку вместо двух. Наличие двух катушек особенно невыгодно в трансформаторах маленьких размеров. Сопоставление БТ и СТ при использовании ленточных сердечников было сделано в § 4.

Технологические вопросы приобретают особое значение при серийном и массовом производстве.

Из всего сказанного ясно, что нельзя однозначно ответить на вопрос, какой же из типов трансформаторов является «абсолютно лучшим». Каждый обладает своими достоинствами и недостатками и должен применяться в зависимости от назначения трансформатора и предъявляемых к нему требований. Сопоставляя эти достоинства и недостатки, можно прийти к следующим рекомендациям по выбору оптимального типа низковольтного трансформатора. Вспомним при этом, что величина падения напряжения практически приобретает значение для меньших мощностей, величина перегрева — для бóльших.

При необходимости обеспечить минимальные веса и габариты и технологичность в производстве лучшим типом трансформатора средних и больших мощностей является стержневой трансформатор на разъемном ленточном сердечнике.

Для малых мощностей лучшим является броневой трансформатор. Броневой трансформатор нужно предпочесть также при использовании штампованных сердечников. Если рассматривать малые трансформаторы на ленточных сердечниках, то в тех случаях, когда на первое место выдвигаются требования простоты конструкции и ее технологичность, лучшим следует признать однокатушечный стержневой трансформатор.

Если необходимо обеспечить минимальное рассеяние без применения наружных экранов, можно применять тороидальный трансформатор.

Таблица 31

Рекомендуемые области применения различных типов однофазных т. м. м.

Виды трансформаторов		f, *гц*	На штампованных сердечниках	На ленточных сердечниках
Низковольтные	Малые		БТ	БТ и 1СТ, СТ
	Средние и большие	50	БТ	СТ
		400	БТ	СТ, ТТ
		>400	БТ, ТТ	ТТ, СТ
Высоковольтные		50	БТ	1СТ и СТ, БТ
		⩾400	БТ, ТТ	СТ, ТТ
С высоким потенциалом		50	БТ, ТТ	СТ, ТТ
		⩾400	ТТ, БТ	ТТ, СТ
При необходимости надежного экранирования			ТТ, СТ	ТТ, СТ

Примечание. Первым указывается тип трансформатора, применение которого предпочтительно.

Тороидальный трансформатор целесообразно применять также в тех случаях, когда речь идет о повышенных частотах, требования технологичности отступают на второй план, а веса и габариты должны быть выдержаны минимально возможными.

Использование ТТ тем более рационально, чем выше рабочая частота. Действительно, намоточные работы при этом облегчаются (уменьшается число витков), а потери в разъемном сердечнике по сравнению с тороидальным все более растут (коэффициент увеличения потерь $к_{раз}$ по табл. 16). Последнее особенно справедливо для сердечников из сплава типа пермаллоя.

Применение ТТ вполне оправдано там, где не освоено производство разъемных сердечников, значительно более сложное, чем производство тороидальных.

Краткое сопоставление типов высоковольтных т. м. м. было сделано в § 4.

В заключение даем сводную табл. 31 рекомендуемых областей применения различных типов однофазных т. м. м.

Трехфазные трансформаторы. Сопоставим веса и объемы ЗТ и лучшего из однофазных — СТ при заданном перегреве. Все коэффициенты в (81) и (94) можно считать одинаковыми. Поэтому

$$э \equiv к_э \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu},$$

или

$$э \equiv к_э.$$

Вычислив $\frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$ и $к_э$ по формулам, приведенным в § 18—20, получим, что ЗТ оптимальной геометрии имеет бóльшие вес и объем, чем однофазный трансформатор — при повышенных частотах на 25—15%, при нормальной частоте — на 15—25%. При одинаковом Δu ЗТ имеет худшие показатели, чем лучший однофазный БТ на 30—25%.

Однако по сравнению с тремя однофазными трансформаторами на ту же суммарную мощность один трехфазный окажется более выгодным из-за большей компактности.

Намагничивающий ток у ЗТ при равных индукциях значительно больше, чем у однофазных.

§ 23. ОПТИМАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Проведенное теоретическое рассмотрение позволяет найти в общем виде выражения для оптимальных электромагнитных нагрузок сердечника и катушек — индукции B и плотности тока j. Оптимальные B и j обеспечивают достижение минимального для выбранной геометрии веса, объема и стоимости (одновременно) при заданных требованиях — перегреве или падении

напряжения. Выражения для B и j могут быть получены в двух видах — в зависимости от размеров сердечника (ширины стержня a) или в зависимости от мощности трансформатора. Выражения второго вида являются более общими.

Выражения для электромагнитных нагрузок рассмотрим раздельно, в зависимости от поставленных требований.

Трансформаторы повышенной частоты, рассчитываемые на заданный перегрев. Имеется в виду случай, когда и j и B ограничиваются допустимыми потерями (см. § 15). Выражения для j и B могут быть получены из (75) и (76), если входящие в них геометрические величины выразить в соответствии со (127) по табл. 26. Тогда

$$j=\sqrt{\frac{\alpha_{\text{к}}\Delta\tau_{\text{к}}}{\rho\kappa_{\text{ок}}}\,\frac{1}{a}}\,\sqrt{\frac{\varphi_{\text{пк}}}{\varphi_{\text{к}}}\,\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}}; \tag{133}$$

$$B=\sqrt{\frac{\alpha_{\text{к}}\Delta\tau_{\text{к}}}{\gamma_{\text{c}}\kappa_{\text{c}}}\,\frac{10^{11}}{p_{10}}\,\frac{1}{a}}\,\sqrt{\frac{\varphi_{\text{пк}}}{\varphi_{\text{c}}}\,\nu\,\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}}. \tag{134}$$

Здесь соотношение ν следует принимать оптимальным для получения минимальных «э» по (106), близким к единице, для получения максимального к. п. д. или каким-либо другим из тех или иных соображений.

Вторые сомножители в (133) и (134) при выбранном ν зависят исключительно от геометрии сердечников. При выбранной, например, оптимальной геометрии по § 20 β и φ_i известны и j и B при прочих равных данных зависят только от абсолютных размеров трансформатора и при заданном перегреве уменьшаются обратно пропорционально корню квадратному из линейного размера.

По (133) и (134) легко могут быть рассчитаны значения j и B для каждого типоразмера принятого ряда сердечников при заданном перегреве и известных $\alpha_{\text{к}}$, ρ, p_{10}, κ_{c}, $\kappa_{\text{ок}}$, ν, φ_i, β.

Для пересчета j и B с перегрева $\Delta\tau_{\text{к}1}$ на некоторый другой перегрев $\Delta\tau_{\text{к}2}$ достаточно вычислить

$$j_2=j_1\sqrt{\frac{\Delta\tau_{\text{к}2}}{\Delta\tau_{\text{к}1}}},\quad B_2=B_1\sqrt{\frac{\Delta\tau_{\text{к}2}}{\Delta\tau_{\text{к}1}}}. \tag{135}$$

Аналогичным образом, в соответствии со (133) и (134), пересчитываются j и B на иные значения p_{10}, $\alpha_{\text{к}}$, $\kappa_{\text{ок}}$, κ_{c}, ρ. Например, при переходе от меди к алюминию

$$j_{\text{а}}=j_{\text{м}}\sqrt{\frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{а}}}\,\frac{\kappa_{\text{м}}}{\kappa_{\text{а}}}}. \tag{136}$$

При равных $\kappa_{\text{ок}}$ ($\kappa_{\text{м}}=\kappa_{\text{а}}$) это дает

$$j_{\text{а}}\approx 0{,}8j_{\text{м}}. \tag{137}$$

Если принять в соответствии с данными § 12 и 19, что $\kappa_{\text{м}}=0{,}3$; $\kappa_{\text{а}}=0{,}6$, то $j_{\text{а}}=0{,}56\,j_{\text{м}}$.

Таким образом, при переходе к алюминиевым обмоткам плотность тока должна быть существенно понижена для тех же типоразмеров трансформаторов. Индукция при этом, если специально не менять величину $к_с$, остается прежней.

При переходе к другой частоте j остается прежней, а B меняется в соответствии с изменением p_{10} по (3) и табл. 16. Из (67) и (3)

$$B \equiv \frac{1}{\sqrt{p_{10}}} \equiv \frac{1}{\sqrt{f^{x}}} \equiv \frac{1}{f^{0,85-0,6}}, \tag{138}$$

где показатель при f зависит от сорта материала.

Найдем теперь более общую зависимость j и B от мощности трансформатора P. С этой целью в (133) и (134) выразим a через P. Вернемся к выражениям (72) и (81), причем для определенности и упрощения конечных формул примем $э = v$, $Э = V$, $к_э = к_v$. Очевидно,

$$V = \varphi_v a^3,$$

где φ_v — по табл. 26.

Следовательно,

$$a = \sqrt[3]{\frac{V}{\varphi_v}}. \tag{139}$$

Но

$$V = vP$$

и

$$a = \sqrt[3]{P\frac{v}{\varphi_v}}. \tag{140}$$

Выразив теперь v по (81) и приняв $к_v$ по (128), получим, подставляя (140) в (133) и (134),

$$j = \sqrt[6]{\frac{(\alpha_к \Delta\tau_к)^4 f}{P}} \sqrt[12]{\frac{к_с}{2\rho^7 к_{ок}^5 \gamma_с p_{10}}}\,\varphi_j; \tag{141}$$

$$B = 3\sqrt[6]{\frac{(\alpha_к \Delta\tau_к)^4 f}{P}} \sqrt[12]{\frac{к_{ок}}{\rho \gamma_с^7 p_{10}^7 к_с^5}}\,10^5 \varphi_B. \tag{142}$$

Здесь φ_j и φ_B зависят от геометрии сердечника и выбранного режима работы, именно:

$$\varphi_j = \sqrt[6]{m\varphi_s \varphi_{ок} \frac{\varphi_{пк}^4}{\sqrt{\varphi_к^7 \varphi_с}} \sqrt{\nu} \left(\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}\right)^4}; \tag{143}$$

$$\varphi_B = \sqrt[6]{m\varphi_s \varphi_{ок} \frac{\varphi_{пк}^4}{\sqrt{\gamma_к \varphi_с^7}} \sqrt{\nu^7} \left(\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}\right)^4}, \tag{144}$$

где φ_i — по табл. 26, β — по (45).

При $\nu = \nu_0$ по (106) φ_j и φ_B зависят только от геометрии.

Выражения (141) и (142) позволяют рассчитать j и B для любых условий при заданной мощности, ибо все входящие в них величины обычно известны (относительно $\kappa_{ок}$ см. § 26), а зависимость $\alpha_к$ от P для СТ и наиболее часто встречающихся условий приводилась на рис. 77, в § 16. Так же рассматривались зависимости $\alpha_к$ от различных факторов.

На рис. 109 приводим зависимости j и B от P для БТ, СТ, ТТ, 1СТ и 3Т, вычисленные для условий: геометрия соответствует средним типоразмерам групп рядов ленточных сердечников по табл. 38—41, $\Delta\tau_к = 50°$, $f = 400$ *гц*, $p_{10} = 11$ *вт/кг* для разъемных сердечников БТ, СТ, 3Т и 9,5 *вт/кг* для ТТ (сердечники II и I групп качества из стали Э35 по табл. 17), $\kappa_{ок} = 0{,}3$, $\kappa_c = 0{,}9$, $\nu = \nu_0$ по (106), обмотки медные, $\alpha_к$ — по рис. 77 для СТ и 3Т с учетом шасси по (62) и с необходимыми коррективами для других типов (см. § 16). При необходимости пересчитать эти кривые на некоторые другие $\Delta\tau_к$, κ_c, $\kappa_{ок}$, p_{10}, $\alpha'_к$ (в частности на оптимальные значения $\kappa_{ок}$ и κ_c) нужно j и B умножить на коэффициенты, соответственно

$$\left.\begin{aligned} &\sqrt[3]{\left(\frac{\alpha'_к}{\alpha_к}\right)^2\left(\frac{\Delta\tau_к}{50}\right)^2}\,\sqrt[12]{\frac{\kappa_c}{0{,}9}\,\frac{11}{p_{10}}\cdot\left(\frac{0{,}3}{\kappa_{ок}}\right)^5} \approx \\ &\quad\approx \sqrt{\frac{0{,}3}{\kappa_{ок}}}\,\sqrt[3]{\left(\frac{\alpha'_к}{\alpha_к}\right)^2\left(\frac{\Delta\tau_к}{50}\right)^2} \quad \text{и} \\ &\sqrt[3]{\left(\frac{\alpha'_к}{\alpha_к}\right)^2\left(\frac{\Delta\tau_к}{50}\right)^2}\,\sqrt[12]{\left(\frac{\kappa_{ок}}{0{,}3}\,\frac{11}{p_{10}}\right)^7\left(\frac{0{,}9}{\kappa_c}\right)^5} \approx \\ &\quad\approx \sqrt{\frac{11}{p_{10}}\,\frac{0{,}9}{\kappa_c}}\,\sqrt[3]{\left(\frac{\alpha'_к}{\alpha_к}\right)^2\left(\frac{\Delta\tau_к}{50}\right)^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (145)$$

Из кривых на рис. 109 видно, что при равных мощностях наиболее высокие плотности тока и индукции допускают СТ, затем — БТ и ТТ, наименьшие — 1СТ (из однофазных трансформаторов). У трехфазных трансформаторов B выше, чем у однофазных, а j — как у БТ.

Трансформаторы нормальной частоты, рассчитываемые на заданный перегрев. Выше, в § 19, был найден оптимальный ток намагничивания. Зная оптимальные i_0, можно найти и соответствующие им оптимальные индукции. Для этого необходимо си-

стему уравнений (11) и (88) решить относительно B

$$B=B_0\frac{1+\sqrt{1+\dfrac{i_0}{1+\sqrt{1+i_0^2}}\,\dfrac{400\kappa_{Fe}}{B_0}\sqrt{\dfrac{\alpha_\kappa\Delta\tau_\kappa\kappa_{ок}}{\rho}\,\dfrac{s_{ок}}{l_c}}\sqrt{\dfrac{\Pi'_\kappa}{V_\kappa}\left(1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c\dfrac{\delta}{l_c}+1\right)}}}{2\left(1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c\dfrac{\delta}{l_c}+1\right)}. \qquad (146)$$

Рис. 109. Зависимости плотности тока и индукции от мощности т. м. м. при заданном перегреве для частоты 400 *гц*. Сталь Э35; $\Delta\tau_\kappa=50°$; $\kappa_{ок}=0{,}3$; $\kappa_c=0{,}9$.

Пользуясь выражениями (127), получим

$$B=B_0\frac{1+\sqrt{1+\dfrac{i_0}{1+\sqrt{1+i_0^2}}\,\dfrac{400\kappa_{Fe}}{B_0}\sqrt{\dfrac{\alpha_\kappa\Delta\tau_\kappa\kappa_{ок}}{\rho}\,\dfrac{\varphi_{ок}}{\varphi_c}}\sqrt{\dfrac{\varphi'_{пк}}{\varphi_\kappa}\left(1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c\dfrac{\delta}{l_c}+1\right)}\sqrt{a}}}{2\left(1{,}14\kappa_{Fe}\kappa_c\dfrac{\delta}{l_c}+1\right)}. \qquad (147)$$

Как видим, с ростом размеров трансформатора (a) оптимальная индукция при $i_0=\text{const}$ несколько возрастает. Этот рост возможен до тех пор, пока не возникнет необходимости ограничивать B из условий допустимых потерь. Практически, однако, с уменьшением мощности допускают бóльшие токи намагничивания, поэтому во всем диапазоне значений a можно принять $B=\text{const}$. Лишь при очень малых a индукция несколько снижается.

В соответствии со сказанным практически постоянной будет индукция и в зависимости от мощности трансформатора. Практически почти во всем диапазоне мощностей и для все типов т. м. м. можно получить по (147)

$$B=(1{,}05-1{,}2)\,B_0, \qquad (148)$$

где B_0 — по (86) и рис. 80.

Отсюда для холоднокатаной стали $B=16\,000—18\,000$ *гс*, для горячекатаной — $B=11\,000—12\,500$ *гс*. Нижние пределы следует принимать для меньших мощностей, особенно при возможных увеличениях питающего напряжения свыше $+5\%$, а также при несовершенной технологии изготовления сердечников. Для очень малых трансформаторов (до 5—10 *ва* при нормальных перегревах) индукции могут несколько снижаться. Для сердечников с уширенным ярмом индукцию можно увеличить до 12 500—14 000 *гс*.

Плотность тока можно определить по-прежнему на основании (75). Однако теперь нельзя принимать $\nu=\nu_0$, ибо при частоте 50 *гц* это соотношение заведомо невыполнимо и обычно $\nu<1$, а значит и $\nu<\nu_0$. При выводе общего выражения для «э» мы, не делая заметной ошибки, вообще пренебрегали потерями в стали p_c, полагая $\nu=0$. Теперь же для более точного определения j желательно принять в расчет эти потери. Сделаем это. Величины индукции нами уже определены. Поэтому для сердечников из каждого материала можно определить для индукций B по (148) потери p_c по (67), находя p_{10} для частоты 50 *гц*.

Подставляя $p_к$ по (17) и p_c по (67) в уравнение для перегрева (44), пользуясь записью (127) и решая уравнение относительно j, получим

$$j=\sqrt{\frac{\alpha_к\Delta\tau_к\varphi_{пк}\,\dfrac{1+\beta\sqrt{\nu}}{a}-p_{10}B^2\gamma_c\kappa_c10^{-11}\varphi_c}{\kappa_{ок}\rho\varphi_к}}. \qquad (149)$$

Как явствует из этого выражения, с ростом размеров трансформатора j падает. При малых размерах (a мало) первый член в числителе при неизменной геометрии значительно больше второго, которым практически можно пренебречь. Если при этом сопоставить (149) и (133), то можно видеть, что для одних и тех

же типоразмеров плотность тока при нормальной частоте выше, чем при повышенных в отношении $\sqrt{\frac{1+\nu}{1+\beta\sqrt{\nu}}(1+\beta\sqrt{\nu_{50}})}$, где ν — для повышенной частоты (например $\nu=\nu_0$), ν_{50} — для частоты 50 *гц*. С ростом размеров второй член в числителе (149) приобретает все большее значение.

Влияние величин $\kappa_{ок}$ и ρ сохраняется тем же, что для трансформаторов повышенной частоты. В частности, при переходе к алюминиевым обмоткам сохраняются соотношения (136), (137). Влияние $\Delta\tau_к$ оказывается несколько большим, но в первом приближении можно пользоваться выражением (135).

Выведем теперь зависимость j от мощности P. Для этого в (133) необходимо выразить через P размер a и соотношение ν. Для нахождения a воспользуемся (140), взяв v по (94). Тогда получим

$$a=\sqrt[7]{\left[\frac{P}{\kappa_1 f\kappa_c B_0}\sqrt{\frac{\rho}{\kappa_{ок}\alpha_к\Delta\tau_к}}\right]^2}\,\varphi_a, \tag{150}$$

где φ_a зависит только от геометрии:

$$\varphi_a=\sqrt[7]{\frac{1}{(m\varphi_s\varphi_{ок})^2}\frac{\varphi_к}{\varphi'_{пк}}}. \tag{151}$$

Подставляя теперь a в (133), придем к окончательному результату

$$j=\sqrt[7]{\frac{\alpha_к^4\Delta\tau_к^4 f}{P}\frac{\kappa_1\kappa_c B_0}{\rho^4\kappa_{ок}^3}}\sqrt{\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}}\cdot\varphi_j, \tag{152}$$

причем φ_j зависит только от геометрии трансформатора и определяется равенством

$$\varphi_j=\sqrt[7]{m\varphi_s\varphi_{ок}\frac{\sqrt{\varphi'_{пк}}}{\varphi_к^4}\sqrt{\varphi_{пк}}}\approx\sqrt{m\varphi_s\varphi_{ок}\left(\frac{\varphi_{пк}}{\varphi_к}\right)^4}. \tag{153}$$

В (150) — (153) κ_1 берется по (91), а φ_i — по табл. 26.

Что касается роли ν в (152), то в первом приближении можно принять

$$\sqrt{\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu}}\approx 1. \tag{154}$$

Для точного определения ν найдем, пользуясь (17), (67) и (127),

$$\nu=\frac{p_c}{p_к}=\frac{p_{10}B^2\gamma_c\kappa_c 10^{-11}\varphi_c}{j^2\rho\kappa_{ок}\varphi_к}. \tag{155}$$

Здесь B — по (148), j ориентировочно берется по (152) при условии (154).

Нахождение ν может быть произведено также по следующим приближенным формулам:

$$\nu = 1{,}4 \frac{p_{10} \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \sqrt{P}}{\sqrt[4]{\Delta\tau_к^5}} \frac{\varphi_с}{\varphi_к}, \tag{156}$$

где φ_i — по табл. 26.

Для БТ и СТ может быть использована более точная формула

$$\nu = 1{,}4 \frac{\kappa_\nu \, p_{10} \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \sqrt{\beta P}}{\sqrt[4]{\Delta\tau_к^5}} \cdot \frac{\varphi_с}{\varphi_к}, \tag{157}$$

где для БТ $\kappa_\nu = 1$, для СТ $\kappa_\nu = 1{,}75$.

Выражением (154) можно с успехом пользоваться при упрощенных расчетах, а также при расчете т. м. м. малых мощностей и т. м. м. с высокими рабочими перегревами.

Кривые зависимости j от P по (152) построены для БТ, СТ, ТТ, 1СТ и 3Т на рис. 110. Условия по геометрии, величинам $\Delta\tau_к$, $\alpha_к$, $\kappa_с$, $\kappa_{ок}$, ρ те же, что для кривых рис. 109, $f = 50$ *гц*, $B_c = 15\,500$ *гс*, $p_{10} = 1$ *вт/кг*. При необходимости пересчитать эти кривые на некоторые другие $\Delta\tau_к$, $\alpha'_к$, $\kappa_с$, $\kappa_{ок}$, B_0 (в частности, на оптимальные значения $\kappa_{ок}$) необходимо умножить j на коэффициент

$$\sqrt[7]{\left(\frac{\alpha'_к}{\alpha_к} \cdot \frac{\Delta\tau_к}{50}\right)^4 \cdot \frac{\kappa_с}{0{,}9} \cdot \frac{B_0}{15500} \cdot \left(\frac{0{,}3}{\kappa_{ок}}\right)^3} \approx$$

$$\approx \sqrt{\frac{\alpha'_к}{\alpha_к} \frac{\Delta\tau_к}{50} \frac{0{,}3}{\kappa_{ок}}} \sqrt[7]{\frac{B_0}{15\,500}}. \tag{158}$$

Из рис. 110 видно, что при равной мощности наибольшую плотность тока допускают СТ, затем 3Т и ТТ.

Трансформаторы, рассчитываемые на заданное падение напряжения. Поскольку это обычно малые трансформаторы, то выбор B можно производить по (148) как для нормальной частоты, так и для частоты 400 *гц*. Если, однако, мощность значительна, то для повышенных частот можно ориентировочно подсчитать B по (142). Выбирается меньшая из величин, полученных по (148) и (142). При расчете B по (142) ν может оказаться лежащим в пределах от ν_0 до $\nu \gg \nu_0$, поэтому B может лежать между значениями по рис. 109 и значениями, соответствующими (148).

Основной интерес представляет расчет плотности тока j.

Из (97) находим, пользуясь выражениями вида (127),

$$j = 2{,}22 \times 10^{-6} \frac{f\kappa_c B}{\rho} \cdot \Delta u \frac{\varphi_{ок}\varphi_s}{\varphi_к} a. \quad (159)$$

Из (159) следует, что при постоянном Δu и прочих равных данных плотность тока растет пропорционально размеру a и не зависит от величины $\kappa_{ок}$.

Найдем зависимость j от P, для чего прежде всего выразим через P размер a. Решая совместно (140), (101) при $\text{э} = v$ и подставляя κ_v по (130), найдем

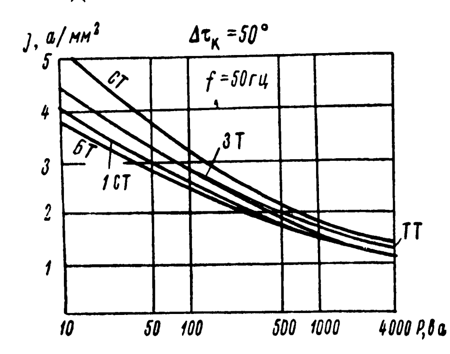


Рис. 110. Зависимость плотности тока от мощности т. м. м. при заданном перегреве для частоты 50 *гц*. Сталь Э320; $\Delta\tau_к = 50°$; $\kappa_{ок} = 0{,}3$.

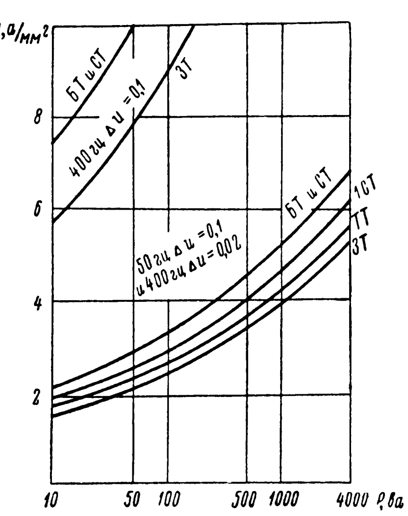


Рис. 111. Зависимость плотности тока от мощности т. м. м. при заданном падении напряжения. $\kappa_{ок} = 0{,}2$.

$$a = \sqrt[5]{P \frac{\rho}{j^2 \kappa_{ок}\kappa_c^2 B^2 (2{,}22 \times 10^{-6})^2 \Delta u}} \sqrt[5]{\frac{\varphi_к}{m\varphi_s^2 \varphi_{ок}^2}}. \quad (160)$$

Подставляя a в (159), приходим к выражению

$$j = \sqrt[5]{P \frac{f^3\kappa_c^3 B^3}{\kappa_{ок}\rho^4} \cdot \Delta u^4 (2{,}22 \times 10^{-6})^3 \cdot \varphi_j}, \quad (161)$$

где

$$\varphi_j = \sqrt[5]{\frac{\varphi_s^3\varphi_{ок}^3}{m\varphi_к^4}}, \quad (162)$$

φ_i — по табл. 26.

Величина φ_j отражает зависимость j от геометрии сердечника.

При неизменной геометрии сердечников и постоянной мощности допустимая плотность тока примерно пропорциональна заданному падению напряжения.

Кривые зависимости j от P для различных типов трансформаторов построены при $\Delta u=0{,}1$ и частоте 50 *гц* на рис. 111. Условия по геометрии сердечников, величинам κ_c и ρ те же, что для кривых рис. 109 (см. выше), $\kappa_{ок}=0{,}2$, $B=17\,000$ *гс* (холоднокатаная сталь). При необходимости пересчитать эти кривые на некоторые другие Δu, κ_c, $\kappa_{ок}$, B нужно умножить j на коэффициент

$$\sqrt[5]{\left(\frac{\Delta u}{0{,}1}\right)^4\left(\frac{B}{17\,000}\right)^3\frac{0{,}2}{\kappa_{ок}}\left(\frac{\kappa_c}{0{,}9}\right)^3}\approx\sqrt{\frac{\Delta u}{0{,}1}\,\frac{B}{17\,000}}\,. \qquad (163)$$

Коснемся вопроса зависимости j от частоты и материала проводников. При переходе от меди к алюминию на данном типоразмере ($a=\mathrm{const}$) величина j по (159) должна быть снижена в $\frac{\rho_а}{\rho_м}$ раз, т. е.

$$j_а=j_м\frac{\rho_м}{\rho_а}=0{,}62j_м. \qquad (164)$$

При заданной мощности по (161)

$$j_а=j_м\sqrt[5]{\frac{\kappa_м\rho_м^4}{\kappa_а\rho_а^4}}\,. \qquad (165)$$

Если $\kappa_{ок}$ сохраняется прежним ($\kappa_а=\kappa_м$), то

$$j_а=0{,}7j_м. \qquad (166)$$

Если принять $\kappa_м=0{,}3$; $\kappa_а=0{,}6$, то

$$j_а=0{,}4j_м, \qquad (167)$$

т. е. плотность тока должна быть снижена при том же Δu более чем в два раза.

С ростом частоты j по (161) значительно, более чем в пропорции $\sqrt{f}$, возрастает, однако следует учесть, что постоянство индукции B можно принять лишь для небольших мощностей и частот не свыше 500 *гц*. Иначе индукцию приходится ограничивать из условия потерь в сердечнике. Принимая в этом случае B по (142) и p_{10} по (3), получим

$$j\equiv\sqrt[10]{Pf^{3-1}}\approx\sqrt[3]{f}-\sqrt[10]{f}\,. \qquad (168)$$

Как видим, при этих условиях рост j с ростом P и f значительно замедляется.

Кривые зависимости j от P для частоты 400 *гц* и $\Delta u=0{,}1$ и 0,02 приведены также на рис. 111. Условия те же, что выше.

При необходимости пересчитать эти кривые на другие Δu можно воспользоваться (163), а на более высокие частоты (при $\Delta u=0{,}02$) — выражением (168).

Отметим, что с учетом замечания, приведенного в § 18, в (159) — (161) и (163) вместо члена Δu нужно более точно принять $\dfrac{\Delta u}{1-\dfrac{\Delta u}{2}}$. При реальных значениях Δu это, однако, не вызывает практически каких-либо изменений в приведенных результатах.

Трансформаторы, рассчитываемые на заданный намагничивающий ток. Этот случай наиболее труден для выявления общих зависимостей j и B от размеров и мощности трансформатора. С другой стороны, он и наименее важен, поскольку при очень малых мощностях приходится ограничивать ток i_0 ниже значений, соответствующих индукциям по (142) или (148).

Для случая малых ленточных сердечников имеем по (103), с учетом (127),

$$B=0{,}9\frac{i_0}{n}\frac{1}{\delta}\frac{\kappa_{ок}}{\kappa_c}j\varphi_{ок}10^2a^2. \tag{169}$$

Значение δ составляет $(1-3)\times10^{-3}$ *см.*

Величина j ограничивается либо условиями нагрева, либо условиями падения напряжения.

По (140), беря $э=v$ по (104), где κ_v — по (131), получим

$$B=\frac{1{,}2}{\kappa_c}\cdot10^3\sqrt[3]{P\frac{i_0^2j\kappa_{ок}}{n}\frac{1}{f\delta^2}}\varphi_B', \tag{170}$$

где

$$\varphi_B'=\sqrt[3]{\frac{\varphi_{ок}}{\varphi_s}}, \tag{171}$$

φ_i — по табл. 26.

§ 24 КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ Т. М. М.

$$\eta=\frac{P}{P+m(p_к+p_c)}=\frac{1}{1+m\dfrac{p_к(1+\nu)}{P}}. \tag{172}$$

При расчете на заданный перегрев выразим $p_к(1+\nu)$ из (46), используя (127) и выражая базовый размер a по (140),

$$p_к(1+\nu)=(1+\beta\sqrt{\nu})\,\alpha_к\Delta\tau_к\varphi_{пк}\sqrt[3]{\frac{v^2}{\varphi_v^2}}\sqrt[3]{P^2}. \tag{173}$$

Для повышенных частот берем v по (81), где κ_v по (128), и получаем

$$\eta=\frac{1}{1+\frac{1}{\sqrt[3]{P}}\sqrt[3]{\frac{2\alpha_{\kappa}\Delta\tau_{\kappa}}{f^2}\frac{p\gamma_c}{\kappa_{o\kappa}\kappa_c}p_{10}}\sqrt[3]{\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{\nu}(1+\nu)^2\varphi_{\eta}}}, \tag{174}$$

где

$$\varphi_{\eta}=\sqrt[3]{m\frac{\varphi_c\varphi_{\kappa}\varphi_{п\kappa}}{(\varphi_s\varphi_{o\kappa})^2}}. \tag{175}$$

Выражение (174) показывает, что при постоянном перегреве η растет с ростом мощности, а при заданной мощности — с ростом частоты, коэффициентов заполнения, улучшением качества сердечника (снижением p_{10}). К. п. д. падает с ростом перегрева и интенсификацией теплоотдачи (рост α_{κ}). Так, рост $\Delta\tau_{\kappa}$ с 50 до 150° приводит к снижению η на 5—10%, причем снижение тем больше, чем меньше мощность P. Из (174) с очевидностью следует, что при $\kappa_{o\kappa}=\text{const}$ переход от меди к алюминию неизбежно приводит к снижению η (на 2—3%), но при сохранении $\frac{\rho}{\kappa_{o\kappa}}=\text{const}$ η остается неизменным, а с уменьшением $\frac{\rho}{\kappa_{o\kappa}}$ (что вполне реально) даже несколько возрастает.

На рис. 112 приводим зависимость η от P для СТ, БТ, ТТ и ЗТ при частоте 400 *гц* и перегревах $\Delta\tau_{\kappa}$ 50° и 100°. Прочие условия те же, что для рис. 109 (см. § 23).

Интересно отметить, что если для *данного трансформатора* условием максимального к. п. д., как известно, является равенство потерь $\nu=1$, то при *данной мощности* и данном перегреве это условие примет вид $\nu<1$, как это следует из (174). Кривые зависимости от ν члена $Y=\sqrt[3]{\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{\nu}}(1+\nu)^2$, определяющего влияние ν на η, построены для разных β на рис. 113.

Для нормальной частоты берем v по (94), где κ_v — по (129), и получаем

$$\eta=\frac{1}{1+\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{\sqrt[7]{P^3}}\sqrt[7]{\frac{\rho^2\gamma_{\kappa}^5\Delta\tau_{\kappa}^5}{\kappa_{o\kappa}^2(\kappa_1 f\kappa_c B_0)^4}\cdot\varphi_{\eta}}}, \tag{176}$$

где ν — по (156), κ_1 — по (91),

$$\varphi_{\eta}=\sqrt[7]{\frac{m^3\varphi_{\kappa}^2\varphi_{п\kappa}^5}{(\varphi_s\varphi_{o\kappa})^4}}. \tag{177}$$

Качественная зависимость η от основных факторов сохраняется прежней (количественно влияние величины мощности и перегрева выражено более сильно).

В частности, все сказанное о переходе к алюминиевым обмоткам сохраняет силу и здесь. Разница в значениях η при равных $к_{ок}$ может доходить здесь до 5%.

Зависимость η от P для БТ, СТ, ТТ и ЗТ при $f=50$ *гц* и $\Delta\tau_к=50°$ и 100° приведена на рис. 112 (что и для частоты 400 *гц*). Условия расчета — те же, что для рис. 110 (см. § 23). Из кривых видно, что при $f=400$ *гц* и равной мощности η т. м. м. существенно выше чем при нормальной частоте.

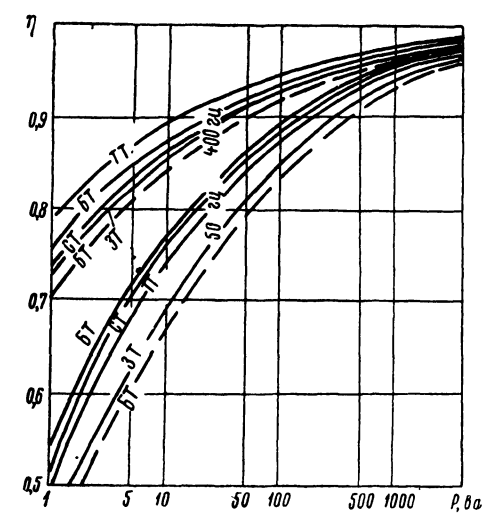


Рис. 112. Зависимость к. п. д. от мощности т. м. м.

——— — $\Delta\tau_к=50°$; - - - - - — $\Delta\tau_к=100°$.

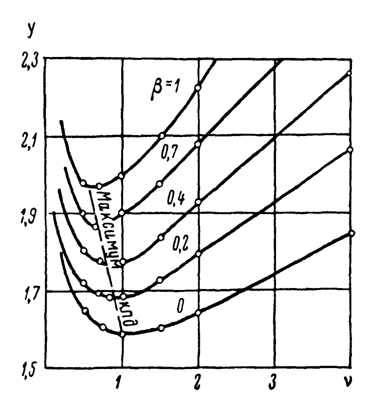


Рис. 113. Влияние соотношения потерь на величину к. п. д.

Видно также, что при равной мощности η БТ несколько выше, чем у СТ; у ТТ — при 400 *гц* выше, а при 50 *гц* ниже, чем у СТ и БТ; а у ЗТ — ниже, чем у однофазных.

При заданном падении напряжения к. п. д. зависит от заданной величины Δu

$$\eta=\frac{1}{1+m\frac{p_к+p_с}{P}}=\frac{1}{1+\Delta u+m\frac{p_с}{P}}. \qquad (178)$$

При частоте 50 *гц* и не очень малых Δu

$$\eta\approx\frac{1}{1+\Delta u}\approx 1-\Delta u. \qquad (179)$$

Для повышенных частот и при малых Δu пренебрегать потерями $p_с$ нельзя, как и при точных расчетах.

В рассматриваемом случае η всегда выше, чем при той же частоте и расчете на допустимый перегрев.

§ 25. УНИФИЦИРОВАННЫЕ РЯДЫ Т. М. М.

Для облегчения централизованного производства т. м. м. в самое последнее время разработаны унифицированные ряды трансформаторов (низковольтных), которые отвечают широкому кругу требований по величинам мощностей, напряжений и токов. Это стало возможным благодаря существенному прогрессу, достигнутому в проектировании т. м. м., и достижению их высоких технико-экономических показателей, соответствующих современному уровню требований.

Под руководством А. Л. Харинского и Р. А. Лашевского создан подобный ряд однофазных галетных трансформаторов стержневого типа на ленточных разъемных сердечниках по табл. 39. Трансформаторы разработаны для частоты питания 400 *гц* при первичном напряжении 115 *в*. Ведутся работы по созданию аналогичного ряда для частоты 50 *гц*, а также с обмотками из алюминиевой фольги. Диапазон мощностей ряда трансформаторов — от 5 до 1000 *ва*, при вторичных напряжениях до 1000 *в*. Вторичные обмотки каждого типоразмера трансформатора могут набираться из различных стандартных галет, соединяемых между собой последовательно или параллельно. Это обеспечивает необходимую гибкость при реализации тех или иных параметров вторичных обмоток.

Все галеты данного типоразмера одинаковы по величине и мощности. Малые трансформаторы содержат 4—8 галет, большие — 8—16 галет. Вариация высоты окна сердечника позволяет для всей группы применять галеты одинаковых размеров. На весь ряд используется 166 галет различных размеров и напряжений. Величины напряжений галет выбраны по 20-му ряду предпочтительных чисел по ГОСТ 8032—56, т. е. нарастают с коэффициентом 1,125. Мощности и напряжения галет соответствуют следующим сочетаниям:

Мощность, *ва*	2	4	6,3	12,5	25	50
Напряжения галет, *в*:						
минимальные	2,5	2,5	2,5	9	20	56
максимальные	56	80	200	250	250	250

Галетные трансформаторы при номинальной мощности и окружающей температуре 100° рассчитаны на срок службы, равный 1000 час. (перегрев $\Delta\tau_к$ — до 50°). За счет улучшенного теплоотвода при помощи охлаждающих ребер (см. рис. 28) возможны перегрузки отдельных галет до 40% без увеличения их перегрева (при превышении номинальной мощности трансформатора не более 12%). При этом отклонения напряжений от номинальных не превышают 0,5—2,5%. Нестабильность вторичных напряжений при изменении температуры окружающей

среды от —60° до +100° не превышает 0,5—3% (последние цифры — для малых мощностей).

Как видно из сказанного, галетные трансформаторы могут быть накальными, анодными, анодно-накальными и т. д.

Унифицированные ряды броневых однофазных трансформаторов в обычном исполнении на ленточных разъемных сердечниках (см. табл. 38) разработаны для частоты 400 *гц* под руководством Е. И. Каретниковой. I ряд — это ряд анодных трансформаторов (ТА1) с вторичными напряжениями от 28 до 320 *в* и токами от 0,06 до 1 *а*, предназначенных в основном для питания аппаратуры на полупроводниках. II ряд — ряд анодных трансформаторов (ТА2) с вторичными напряжениями от 100 до 1200 *в* и максимальными токами от 0,025 до 0,4 *а* при максимальной мощности трансформатора 500 *вт*. Максимальное число вторичных обмоток — 4, они могут использоваться самостоятельно или включаться между собой последовательно и параллельно. Ряды ТА1 и ТА2 включают в себя 180 трансформаторов.

Трансформаторы I и II рядов для облегчения вариации вторичных напряжений имеют по две дополнительные компенсационные обмотки, которые могут включаться согласно или встречно с основными. Напряжение в рядах нарастает с коэффициентами 1,125. III ряд — накальных трансформаторов (ТН) — включает 50 трансформаторов с максимальным числом накальных обмоток — 4. Мощность до 150 *ва*. Вторичные токи от 0,25 до 10 *а*.

Все трансформаторы при перегреве 55° рассчитаны на срок службы в 1000 час. при окружающей температуре 80° и 400 час.— при 100°, а при перегреве 45° — на срок 5000 час. (с пониженной мощностью). Точность вторичных напряжений 2—6%. Возможна перегрузка отдельных обмоток против номинальных токов на 20%. Для трансформаторов трех рядов используется 18 типоразмеров сердечников. Конструкция трансформаторов предусматривает использование повышенных значений коэффициента заполнения окна и обеспечивает высокие коэффициенты теплоотдачи применением мер, указанных в § 16.

Ведется разработка аналогичных рядов трансформаторов для частоты 50 *гц*. При мощностях 50—100 *ва* и выше трансформаторы проектируются в стержневом исполнении (на сердечниках по табл. 39).

Трансформаторы унифицированных рядов отвечают весьма жестким требованиям, предъявляемым к аппаратуре специального назначения. Они могут в значительной мере удовлетворить потребность в т. м. м. на частоту 400 *гц*, а затем и 50 *гц*, для соответствующих условий. Трансформаторы обладают хорошими весовыми и габаритными показателями. Подробная номенклатура унифицированных т. м. м. приведена в каталогах.

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Если трансформатор не может быть подобран из унифицированного ряда (см. § 25), он должен быть рассчитан. Расчет трансформатора распадается на две части — определение основных размеров сердечников и непосредственно электрический расчет. Заданными величинами являются мощность, частота, число обмоток, их напряжения и токи, окружающая температура, допустимый перегрев обмоток. Могут задаваться также допустимое падение напряжения, допустимый намагничивающий ток.

В дальнейшем, если не делается оговорок, расчет излагается для трансформаторов с возможно полным заполнением окна сердечника проводниковым и окна катушки — магнитопроводящим материалами. Для случая неполного, оптимального, заполнения, т. е. оптимальных величин коэффициентов заполнения $\kappa_{ок}$ и $\kappa_с$ (см. § 19 и 20), в соответствующих разделах будут даны необходимые указания.

§ 26. НЕОБХОДИМЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Габаритная мощность трансформатора. По заданным токам и напряжениям легко подсчитывается суммарная мощность вторичных обмоток, или вторичная мощность

$$P_{II}=m\sum_{i=2}^{N}P_i=m\sum_{i=2}^{N}I_iU_i. \tag{180}$$

Здесь i — индекс обмотки, I_i и U_i — токи и напряжения вторичных обмоток в действующих значениях, P_i — их мощности.

До сих пор во всех выражениях фигурировала электромагнитная мощность P. С достаточной для практики точностью мощность P может быть заменена так называемой габаритной мощностью трансформатора $P_г$, являющейся полусуммой вторичной мощности P_{II} и мощности первичной обмотки P_I,

$$P_г=\frac{P_I+P_{II}}{2}. \tag{181}$$

Мощности P_I и P_{II} отличаются друг от друга за счет потерь в трансформаторе, а при наличии анодных обмоток дополнительное отличие может появиться в результате использования определенных схем выпрямления [см. (70)]. Влияние тока i_0 учитывается отдельно коэффициентом n в (11).

Из (181) и (70)

$$P_г=\frac{1}{2}\left(P_{II}+\frac{1}{\eta}\sum_{i=2}^{N}\kappa_{вi}P_i\right). \tag{182}$$

Здесь P_{II} и P_i — по (180), i — номер обмотки, N — число обмоток (включая первичную), η — к. п. д. в относительных еди-

ницах, $к_{вi}$ — по (68) и табл. 22. Для однофазных схем коэффициент $к_{вi}$ всегда равен единице, кроме схем однополупериодной и двухполупериодной со средней точкой. Если т. м. м. не содержит обмоток, работающих на такие схемы, то из (182)

$$P_г = \frac{P_{II}}{2}\left(1 + \frac{1}{\eta}\right). \tag{183}$$

Величина $P_г$ характеризует габариты трансформатора и является отправной при его расчете.

Выбор типа трансформатора и способа его выполнения. Если тип трансформатора и способ его выполнения не заданы расчетчику, то выбирать их следует на основании приведенных указаний следующих разделов книги: тип — § 22, материал сердечника — § 5 и 19, конструкция сердечника — § 4, 8, 9, проводниковый материал — § 7 и 19, конструкция трансформатора — § 4, 12, 11.

Исходные расчетные коэффициенты. При расчете трансформаторов в общем случае необходимо знание следующих исходных величин: коэффициентов заполнения $к_{ок}$ и $к_с$, к. п. д. η, коэффициента теплоотдачи $\alpha_к$, коэффициента распределения окна между обмотками n. Все эти величины зависят от очень большого числа факторов и не могут быть точно определены до завершения всего расчета трансформатора. Поэтому, строго говоря, расчет может идти только методом последовательных приближений, когда принятые значения перечисленных коэффициентов корректируются по результатам расчета и расчет повторяется заново до достижения удовлетворительного совпадения принятых и полученных величин. Однако накопленный практический опыт позволяет достаточно правильно задаться всеми необходимыми исходными величинами в зависимости от тех или иных условий. Ниже конкретные значения этих величин мы будем приводить в ряде случаев для некоторых определенных, типовых условий, условно называемых «нормальными». При этом будут даваться указания, как корректировать приведенные величины на иные условия.

Рассмотрим последовательно эти величины. Максимально достижимая величина коэффициента заполнения сердечника $к_с$ зависит только от толщины материала и технологии изготовления сердечника. Значения $к_с$ для различных из этих условий приводились в гл. IV, табл. 13 и 15. Косвенным образом, через толщину материала, $к_с$ связан с частотой. Для приближенных расчетов нормальным значением можно считать $к_с = 0{,}9$.

Максимально достижимая величина коэффициента заполнения окна $к_{ок}$ зависит от абсолютных размеров окна, количества изоляции, вида проводникового материала, толщины или диаметра проводов, технологии моточных работ (см. § 12).

В свою очередь, каждый из этих факторов определяется целым рядом условий.

Количество изоляции зависит от напряжений обмоток, марки провода (толщина витковой изоляции и необходимость той или иной слоевой изоляции), числа обмоток, способа изоляции от корпуса, качества изоляционных материалов. Так, наивысший коэффициент $к_{ок}$ достигается при низком напряжении, малом числе обмоток, применении эмальпроводов с высокопрочной эмалью (см. § 7), позволяющих обойтись минимумом слоевой изоляции, применении тонкостенных прессованных каркасов из качественных пресс-материалов, использовании для слоевой и межобмоточной изоляции тонких высококачественных синтетических пленок (§ 4, 6).

При прочих равных условиях меньше всего изоляции заключает в себе БТ, поскольку в СТ, ТТ и ЗТ слоевая и частично межобмоточная изоляции повторяются в окне дважды (у двух катушек).

«Нормальными» условиями будем считать для низковольтных трансформаторов применение эмальпроводов ПЭВ-2, бумажной изоляции, прессованных каркасов средней толщины стенок (то же — сборных гетинаксовых каркасов). В отношении числа обмоток и величины напряжения нужно иметь в виду: низковольтные трансформаторы с малым рабочим напряжением (до 300—500 *в*) при любом числе обмоток или с малым числом обмоток (две-три) при любом напряжении — «трансформаторы с малым количеством изоляции»; низковольтные трансформаторы с большим числом обмоток и большим рабочим напряжением (свыше 300—500 *в*) — «трансформаторы с большим количеством изоляции». Высоковольтные трансформаторы будем считать изолированными при помощи заливки термореактивным компаундом.

Диаметр провода зависит от величины тока в обмотке и допустимого перегрева или падения напряжения. Величина $к_{ок}$ тем выше, чем толще провод. В среднем можно считать, что ток обмоток растет с мощностью трансформатора, поэтому в этой зависимости кроется косвенная связь $к_{ок}$ с мощностью трансформатора (при заданных $\Delta\tau_к$ или Δu). Такие средние условия и перегрев $\Delta\tau_к = 50°$ и будем считать «нормальными».

Технология моточных работ зависит от уровня производства и конструкции трансформатора. Так, наибольший коэффициент заполнения обеспечивается при использовании для обмоток тонкой фольги (см. § 12). Для обмоток из провода более высокие $к_{ок}$ достигаются при плотной рядовой намотке (см. § 12). Однако такая намотка не всегда может быть применена. При намотке катушек на замкнутые ленточные сердечники приходится применять ручную намотку, намотку на тороидальных станках или принцип вращающейся катушки. В первых двух случаях окно сердечника полностью не используется из-за остающегося

в середине окна отверстия под челнок, пониженных значений $к_{укл}$ (см. § 12), в последнем случае теряется часть окна, заключенная между стенками круглого каркаса и квадратного сердечника. «Нормальными» условиями будем считать случай рядовой станочной намотки.

«Нормальными» сердечниками будем считать нормализованные сердечники по табл. 38—41 (при необходимости — средние сердечники группы ряда).

Для перечисленных нормальных условий значения $к_{ок}$ для каждого типоразмера сердечника занесены в таблицы рядов 43—49 в § 27.

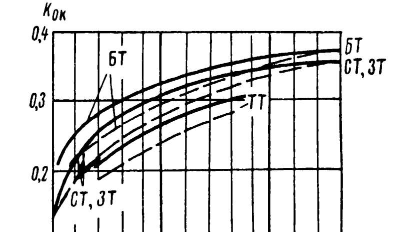


Рис. 114. Зависимость коэффициента заполнения окна от мощности т. м. м.
——— 50 *гц*;
– – – 400 *гц*.

Чтобы получить зависимость величины $к_{ок}$ от мощности трансформатора, надо учесть, что абсолютные размеры окна зависят от мощности трансформатора и его удельного объема $э = v$ по (81), (94) или (101). В свою очередь, v зависит от $к_{ок}$, а также от частоты, качества материалов сердечника и обмоток, геометрии трансформатора, допустимого перегрева или падения напряжения, коэффициента теплоотдачи $\alpha_к$, т. е. от факторов, ряд из которых непосредственно влияет на величину $к_{ок}$. «Нормальными» условиями будем считать: частоты 50 и 400 *гц*, применение ленточных сердечников из стали Э35 второй группы качества, медных обмоток; коэффициент теплоотдачи по рис. 77 с учетом шасси по (62); прочие условия — прежние.

Зависимости $к_{ок}$ от мощности для приведенных нормальных условий даны на рис 114 для всех типов низковольтных трансформаторов при малом количестве изоляции (для случая полного заполнения окна катушкой; при неполном, оптимальном, заполнении окна — см. § 19, 20, табл. 32, рис. 86, 87).

В качестве усредненного, «типового» значения $к_{ок}$ для различных вычислений общего характера и предварительных прикидок принимают $к_{ок} = 0,3$ (для обмоток из медного провода). Для обмоток из фольги «типовой» $к_{ок} = 0,6$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ и влияние на него различных факторов подробно рассматривались в § 16. За нормальные будем принимать те же условия, что при построении кривых на рис. 77 и оговоренные выше при определении $к_{ок}$. Значения $\alpha_к$ для «нормальных» условий для каждого типоразмера сердечника занесены в таблицы рядов 43—49. Зависимость

$\alpha_к$ от мощности при разных частотах для тех же условий приведена на рис. 115.

При необходимости быстрых и грубых прикидок можно принимать некоторое среднее значение $\alpha_к = 1{,}1 \times 10^{-3}$ *вт/см²·°С*.

Корректировка величин $к_{ок}$ и $\alpha_к$ для условий, отличных от «нормальных», может быть произведена с помощью указаний, сведенных в табл. 32.

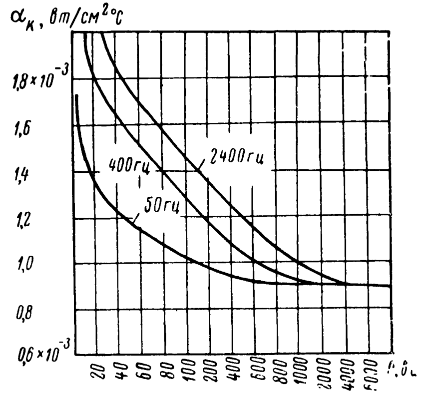


Рис. 115 Зависимость удельного коэффициента теплоотдачи катушек стержневого т. м. м. от мощности при малом количестве изоляции (при наличии теплового контакта сердечника на шасси).

Для БТ коэффициент снижать на 15—20%, для ТТ — на 10%, для ЗТ — не изменять. Для т. м. м. с большим количеством изоляции коэффициент снижать на 15—20%, для сухих т. м. м. с заливкой катушек термореактивным компаундом — на 10%. См. также табл. 32.

Коэффициент полезного действия при заданном перегреве по (174) и (176) зависит от мощности, качества сердечника и его материала, материала проводников, коэффициентов заполнения, частоты, перегрева катушек, коэффициента теплоотдачи, геометрии сердечников — от факторов, уже рассмотренных нами выше. Для нормальных условий η окажется зависящим только от мощности. Такие зависимости для частот 50 и 400 *гц* были приведены на рис. 112. Корректировка значений η на иные условия может быть сделана с помощью указаний, приведенных в § 24.

При заданном не очень малом Δu и частоте 50 *гц* η берется по (179), в иных случаях можно ориентировочно брать η по приведенным графикам для расчета на заданный перегрев (см. § 24). Для грубых прикидок к. п. д. можно принимать равным 0,8—0,9 для частоты 50 *гц* и 0,9—0,95 для частоты 400 *гц*.

Коэффициент распределения окна между обмотками n при расчете на заданный перегрев согласно (84) зависит от величины намагничивающего тока i_0. В свою очередь, ток i_0, если он специально не задан, зависит от режима работы трансформатора (см. § 19). При примерно постоянных или возрастающих с уменьшением мощности индукциях i_0 падает с ростом мощности (см. рис. 67). Зависимость i_0 от мощности для «нормальных» условий и частот 50 *гц* и 400 *гц* показана на рис. 116. Коэффициент n рассчитан по (84) в соответствии с рис. 116 и приведен для частот 50 *гц* и 400 *гц* в зависимости от мощности (на том же рисунке).

Таблица 32

Корректировочные множители для $к_{ок}$ и $\alpha_к$ для условий, отличных от «нормальных» (ориентировочно)

Исходные данные	Для $к_{ок}$: Фактор отличия	Для $к_{ок}$: Множитель	Для $\alpha_к$: Фактор отличия	Для $\alpha_к$: Множитель
$к_{ок}$ и $\alpha_к$ по табл. 43–49 и рис. 114–115	Применение бескаркасных катушек	0,85–0,95	Применение пропитки компаундами **	1,05–1,25
	Наличие только накальных обмоток	1,05–1,15	Применение пропитки трансформатора в сборе	1,05–1,1
	Использование для обмоток фольги	1,7–2	Отсутствие контакта на шасси	0,8–0,9
	Использование для обмоток проводов с волокнистой изоляцией	0,7–0,85	При пониженном давлении D	$\frac{1}{2}\left(1+\sqrt{\frac{D}{760}}\right)$
			Использование проводов с волокнистой изоляцией	0,85–0,9
	Использование пленочной изоляции	1,1–1,2	Использование пленочной изоляции	1–1,25
	При хорошо отработанной технологии	1,1–1,2	При заделке торцов катушек и их покрытий эмалями с высоким лучеиспусканием	1,2–1,3
$к_{ок}$ и $\alpha_к$ по рис. 114–115	Использование сердечников, геометрия которых близка к оптимальной по стоимости	0,77–0,9	Использование сердечников из горячекатаной стали *	0,85–0,95
			Использование перегревов, отличных от перегрева 50° *	$\sim\sqrt[6]{\frac{\Delta\tau_к}{50}}$
	Использование сердечников иного качества и перегревов, отличных от перегрева 50° *	~1	См. также § 16	—
	Наличие большого количества изоляции	0,8–0,9	Наличие большого количества изоляции	0,8–0,9
	Применение заливки термореактивными компаундами (высоковольтные трансформаторы)	0,4–0,6	Применение заливки термореактивными компаундами (высоковольтные трансформаторы)	0,9

* За счет изменения габаритов трансформатора.

** А также рядом лаков с высокой теплопроводностью.

Примечание. При использовании метода неполного заполнения окна катушкой значения $к_{ок}$ снижаются ориентировочно в 1,5–2 раза (точнее – по рис. 86, 87).

Для приближенных расчетов можно принимать для 50 *гц* $i_0=0{,}5$, $n=2{,}1$, для 400 *гц* $i_0=0{,}2$, $n=2$.

При расчете на заданное падение напряжения и заданный намагничивающий ток следует принимать всегда $n=2$ (см. § 18). Величина i_0 может быть произвольной.

При использовании метода оптимальных коэффициентов заполнения $к_{ок}$ и $к_с$ их значения выбирают по указаниям, приведенным в § 19, 20, рис. 86, 87, 88. При

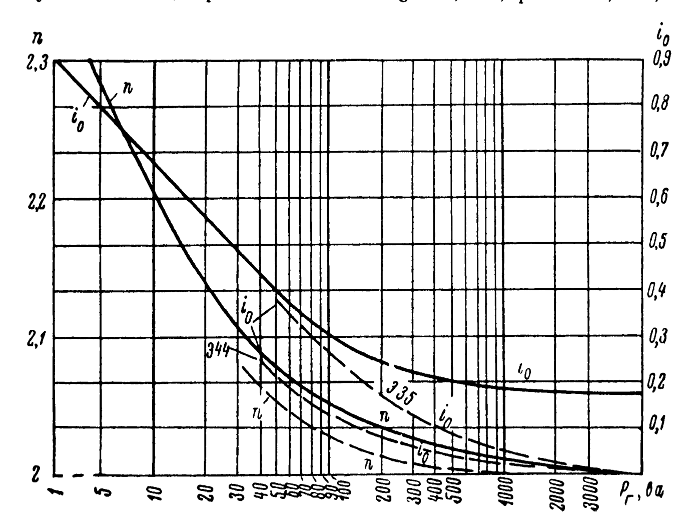


Рис. 116. Зависимости намагничивающего тока и коэффициента распределения окна между обмотками от мощности т. м. м.

———— 50 *гц*;
– – – – 400 *гц*.

(При неполном заполнении окна катушкой величина i_0 несколько возрастает).

пониженных значениях $к_{ок}$ намагничивающий ток i_0 несколько возрастает (примерно пропорционально кубическому корню из отношения коэффициентов заполнения).

§ 27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ СЕРДЕЧНИКОВ

При определении основных размеров сердечника возможны два случая: когда выбор геометрии и размеров сердечника производится произвольно и когда проектировщик ограничен конкретным рядом сердечников (рядом типоразмеров).

Случай произвольного выбора размеров сердечника наиболее часто встречается при расчете трансформаторов относительно большой мощности — свыше нескольких сот вольтампер. Однако он возможен и при любых других условиях, в частности тогда, когда стандартные сердечники по тем или иным причинам не удовлетворяют расчетчика.

Выбор размеров нестандартных сердечников может быть произведен двумя путями.

Определение размеров через электромагнитные нагрузки. Принимая в (11) $P = P_г$ и решая (11) относительно $s_с s_{ок}$, получим

$$s_с s_{ок} = \frac{nP_г}{4{,}44 m f \kappa_{ок} \kappa_с j B} 10^6 \ см^4. \qquad (184)$$

Здесь $P_г$ — габаритная мощность по (182), *ва*, причем η — по рис. 112;
$\kappa_с$ — по табл. 13, 15 и указаниям § 26;
$\kappa_{ок}$ — по рис. 114 и табл. 32.

Задавшись также величинами j и B, можно вычислить по (184) $s_с s_{ок}$ и разбить это произведение на сомножители $s_с$ и $s_{ок}$. Затем, в свою очередь, конкретизируются размеры сторон сердечника a и b и окна c и h (рис. 90), так чтобы

$$ab = s_с, \quad ch = s_{ок}. \qquad (185)$$

Разбивка $s_с s_{ок}$, $s_с$ и $s_{ок}$ производится таким образом, чтобы получить желаемую геометрию трансформатора. Имеем

$$s_с = \frac{(s_с s_{ок})}{s_{ок}} = \sqrt{\frac{(s_с s_{ок})}{\frac{s_{ок}}{s_с}}}. \qquad (186)$$

Оптимальные отношения $\frac{s_{ок}}{s_с}$ для различных условий и типов трансформаторов были даны в табл. 29.

Выбор a, b, c, h в (185) должен быть сделан так, чтобы отношения

$$\frac{b}{a} = y, \quad \frac{c}{a} = x, \quad \frac{h}{a} = z$$

соответствовали оптимальным для заданных условий согласно табл. 27 или 28.

Прибегая к (127), можно и непосредственно из (184) получить базовый размер — ширину стержня a

$$s_с s_{ок} = \varphi_s \varphi_{ок} \cdot a^4 \ \text{и}$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{nP_г \cdot 10^6}{4{,}44 f \kappa_{ок} \kappa_с j B} \, \frac{1}{m \varphi_s \varphi_{ок}}}, \qquad (187)$$

где по табл. 26 для БТ и СТ $\varphi_s \varphi_{ок} = xyz$, ЗТ — $\frac{1}{2} xyz$, ТТ — $\frac{\pi}{4} x^2 y$.

Принимая x, y, z оптимальными для заданных условий согласно табл. 27 (28), находим a, и затем по (126) $b = ya$, $c = xa$ и $h = za$. В случае каких-либо особых обстоятельств значения

x, y, z или $\frac{s_{ок}}{s_c}$ можно принимать и иными, чем указанные, в зависимости от желательной геометрии.

Осталось определить j и B, фигурирующие в (184) и (187). Их определяют при заданной мощности $P = P_г$ по формулам или рисункам (см. § 23):

при заданном перегреве:

для повышенных частот — (141) — (145), рис. 109;

для нормальной частоты — (148) и (152), (153), (158), рис. 110;

при заданном падении напряжения — (161) — (163) и (148) или (142), рис. 111;

при заданном токе намагничивания (для ленточных разъемных сердечников) — (170)—(171).

Поскольку j и B зависят от многих факторов, нельзя указать их значения, универсальные для всех случаев. Их можно каждый раз рассчитывать по приведенным формулам и указаниям в § 23 для конкретных заданных условий с определением входящих в эти формулы коэффициентов в соответствии с изложенным выше, в § 26.

Для самых грубых, ориентировочных прикидок, принимая по § 26 $к_{ок} = 0{,}3$; $к_c = 0{,}9$; $n = 2{,}1$; и для некоторых средних условий $j = 2{,}5$ *а/мм²*, B — по табл. 33, найдем из (184) значения $s_c s_{ок}$, также приводимые в табл. 33

Таблица 33

Значения величины $s_c s_{ок}$ в зависимости от мощности для т. м. м. на стандартных сердечниках (для сугубо ориентировочных подсчетов)

Частота f	50 *гц*		400 *гц*	
Марка стали	Э42	Э35	Э44	Э35
Индукция B, *гс*	12 500	17 000	8000	11 000
$s_c s_{ок}$, *см⁴*	1,1 $P_г$	0,8 $P_г$	0,22 $P_г$	0,16 $P_г$

Подобные упрощенные приемы, однако, относительно приемлемые в радиолюбительстве, ни в коем случае не могут обеспечить правильного результата для серьезной инженерной практики.

Пример расчета.

1. Найти основные размеры ленточного сердечника из холоднокатаной стали для низковольтного трансформатора минимального веса мощностью 750 *ва* при частоте 50 *гц* и перегреве 50°. Все неоговоренные условия «нормальные».

Согласно указаниям в § 22 выбираем стержневой трансформатор как обладающий минимальным весом.

Исходные расчетные величины:

по рис. 112 $\eta = 0{,}955$; по рис. 114 $к_{ок} = 0{,}34$; по табл. 13 $к_с = 0{,}92$; по рис. 116 $n = 2{,}015$; по (148) $B = 17\,000$ *гс*; по рис. 110 $j = 1{,}85$ *а/мм*^{2} [точнее находится по (152) — (158)].

По (182) — (183)

$$P_г = \frac{750}{2}\left(1 + \frac{1}{0{,}955}\right) = 770 \text{ ва}.$$

По табл. 27 выбираем оптимальную геометрию: $x = 1{,}25$; $y = 2$; $z = 5$.

Первый вариант.

По (184)

$$s_c s_{ок} = \frac{2{,}015 \cdot 770 \cdot 10^6}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}34 \cdot 0{,}92 \cdot 1{,}85 \cdot 17\,000} = 715 \text{ см}^4$$

(по таблице ориентировочных прикидок имели бы

$$s_c s_{ок} = 0{,}8 \cdot 770 = 615 \text{ см}^4).$$

Находим оптимальное соотношение

$$\frac{s_{ок}}{s_c} = \frac{xz}{y} = \frac{1{,}25 \cdot 5}{2} = 3{,}12$$

(то же можно взять из табл. 29). По (186)

$$s_c = \sqrt{\frac{715}{3{,}12}} = 15{,}1 \text{ см} \approx 15 \text{ см};$$

$$s_{ок} = \frac{s_c s_{ок}}{s_c} = \frac{715}{15} = 48 \text{ см}^2.$$

Так как

$$s_c = a^2 y,$$

$$a = \sqrt{\frac{15}{2}} = 2{,}75 \text{ см}.$$

Отсюда по (126)

$$b = ya = 2 \cdot 2{,}75 = 5{,}5 \text{ см};$$

$$c = xa = 1{,}25 \cdot 2{,}75 = 3{,}44 \approx 3{,}5 \text{ см};$$

$$h = za = 5 \cdot 2{,}75 = 13{,}7 \approx 14 \text{ см}.$$

Второй вариант.

По (187)

$$\varphi_s \varphi_{ок} = 1{,}25 \cdot 2 \cdot 5 = 12{,}5$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{2{,}015 \cdot 770 \cdot 10^6}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}34 \cdot 0{,}92 \cdot 1{,}85 \cdot 17\,000 \cdot 12{,}5}} = 2{,}75 \text{ см},$$

т. е. то же самое.

II. Тот же случай, но $\Delta\tau_к = 30°$, провода с волокнистой изоляцией, контакт на шасси отсутствует,

Для пересчета j на новые условия воспользуемся (158), найдя предварительно по табл. 32 и прежним исходным величинам:

$$к_{ок} = 0{,}34 \cdot 0{,}85 = 0{,}29;$$

$$\frac{a_к'}{a_к} = 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot \sqrt[6]{\frac{30}{50}} = 0{,}74.$$

Тогда

$$j = 1{,}85 \cdot \sqrt{0{,}74 \cdot \frac{30}{50} \cdot \frac{0{,}3}{0{,}29}} = 1{,}85 \cdot 0{,}68 = 1{,}25 \ a/мм^2.$$

По (184)

$$s_c s_{ок} = 715 \cdot \frac{0{,}34}{0{,}29} \cdot \frac{1{,}85}{1{,}25} = 1240 \ см^2.$$

Далее, как и в первом примере.

Определение размеров через удельный объем трансформатора. Этот способ расчета основан на использовании выражений для удельных экономических показателей $э = v$, выведенных на основании теоретического анализа в § 18, и позволяет исключить промежуточное определение величин j и B, уменьшив число независимых переменных расчета. Действительно, зная v, легко найти по (140) a при $P = P_г$.

Задавшись желательной геометрией сердечника, можно по табл. 26 определить для выбранного типа трансформатора φ_v, после чего по (126) легко находятся все основные размеры b, c, h.

Расчет через удельный объем v ведется практически наиболее просто, почему и принято $э = v$. Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Выбираем желательную геометрию трансформатора, т. е. параметры x, y, z по (125) и рис. 90. Если нет специальных требований, величины x, y, z должны быть выбраны оптимальными для заданных условий и выбранного типа трансформатора по табл. 27 (28), § 20.

2. Вычисляем удельный объем трансформатора v.

О вычислении v сказано ниже, в п. 7.

3. Находим габаритный объем V.

По (71)

$$V = vP_г \ см^3.$$

4. Находим базовый размер a — ширину несущего стержня. По (139) и (140)

$$a = \sqrt[3]{\frac{V}{\varphi_v}} = \sqrt[3]{\frac{vP_г}{\varphi_v}},$$

где φ_v вычисляется по табл. 26 для выбранного типа и геометрии (x, y, z) трансформатора.

Для «нормальных» условий (см. § 26) имеем:

Тип трансформатора	БТ	СТ	ТТ	ЗТ
Величина φ_v	48,5	$\frac{56^*}{107^{**}}$	133	158

5. Находим по (126) остальные размеры сердечника для принятой геометрии (x, y, z), *см*:

$$c = xa, \quad b = ya, \quad h = za.$$

6. Если какие-либо из найденных размеров желательно несколько изменить или округлить, сделать это следует так, чтобы произведение

$$s_c s_{ок} = abch$$

по возможности сохранилось постоянным (путем изменения в противоположную сторону иного размера).

На этом расчет заканчивается.

7. Итак, возвращаемся к вычислению удельного объема v (см. п. 2).

Расчет на перегрев трансформаторов повышенной частоты. По (81)

$$v = \frac{2\sqrt{2}}{\alpha_к \Delta\tau_к f} \sqrt{\frac{\rho\gamma_c}{к_c к_{ок}} p_{10}} \; \frac{\varphi_{v=1}}{\varphi_v} к_v \; \frac{см^3}{ва}, \qquad (188)$$

где $\Delta\tau_к$ — заданный перегрев катушек, °С;

f — заданная частота, *гц*;

γ_c — удельный вес материала сердечника, *г/см*³ — по табл. 2 и 4;

ρ — «горячее» удельное сопротивление проводникового материала, определяемое при условной температуре 75°, *ом·мм*²*/м*; $\rho = 1{,}22\ \rho_{20°}$, где $\rho_{20°}$ — по § 7;

$к_{ок}$, $к_c$, $\alpha_к$ — коэффициенты заполнения и теплоотдачи, определяемые в зависимости от заданной мощности $P_г$ и других выбранных условий по рис. 114, 115 и табл. 13, 15, 32 в соответствии с указаниями, приведенными в § 26;

p_{10} — удельные потери в сердечнике (*вт/кг*), определяемые для заданной частоты и выбранной конструкции сердечника и его материала по (5) и табл. 3, 4, 16; для стали Э35 и частоты 400 *гц* p_{10} берутся по табл. 17, гл. IV, для выбранной группы качества:

---

* Для групп I—IV ряда.

** Для групп V—X ряда.

φ_ν — коэффициент режима работы, определяемый для выбранного типа и геометрии трансформатора и желательного режима работы по (78):

$$\varphi_\nu = \sqrt{\nu}\,\frac{1+\beta\sqrt{\nu}}{1+\nu},$$

где

$$\beta = \frac{\varphi_{пс}}{\varphi_{пк}}$$

(по табл. 26),

$$\nu = \frac{p_c}{p_к}$$

по (40);

$к_v$ — коэффициент геометрии по объему, определяемый для выбранного типа и геометрии трансформатора x, y, z по (128) и формулам табл. 26, можно также взять величину $к_v$ по рис. 91, 96, 102, 105; значения $к_v$ для «нормальных» сердечников (см. § 26) приведены в табл. 34.

Таблица 34

Вспомогательные расчетные величины

Тип трансформатора	$\frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$	$к_v$				v, *см³/ва*		
		$\Delta\tau_к = \mathrm{const}$		При заданном Δu	При заданном i_0	$\Delta\tau_к = 50°$		$\Delta u = 0{,}05$
		Повышенные частоты	Нормальная частота			400 *гц*	50 *гц*	50 *гц*
Броневой	0,85	3,3	10	55	16	0,92	4,2	7,3
Стержневой	0,95	2,6	9,2	52	14	0,81	3,8	6,9
Тороидальный	1	2,5	10	58	—	0,82	4,2	7,4
Трехфазный	0,93	3	14	84	—	0,92	5,8	11,1

Для получения минимальных веса, объема, стоимости $\nu = \nu_0$ по (106): для БТ $\nu_0 = 1 + \beta$, для СТ и ЗТ $\nu_0 = (1+\beta)^2$, для ТТ $\nu_0 = 1$. Величина $\varphi_{\nu=1}$ есть φ_ν при $\nu = 1$. Для «нормальных»

условий значения $\frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu}$ приведены в табл. 34. Для получения максимального к. п. д. $\nu \approx 1$ (см. рис. 113).

Для «нормальных» условий (см. § 26)

$$v = 0{,}023 \frac{1}{\alpha_к f} \sqrt{\frac{1}{к_с к_{ок}} \cdot p_{10}} \; \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu} \, к_v. \qquad (189)$$

Для «типовых» значений $к_{ок} = 0{,}3$; $к_с = 0{,}9$; $\alpha_к = 1{,}1 \times 10^{-3}$

$$v = 39{,}4 \frac{1}{f} \sqrt{p_{10}} \; \frac{\varphi_{\nu=1}}{\varphi_\nu} \, к_v.$$

Для частоты 400 *гц* при всех указанных допущениях и нормальных ленточных сердечниках из стали Э35 второй группы качества (для ТТ — первой) ориентировочные значения v для разных типов т. м. м. приведены в табл. 34.

Эти величины могут быть использованы при предварительных грубых подсчетах. При отклонении одного или нескольких условий от приведенных выше данные величины v могут быть пересчитаны в соответствии со (188).

Расчет на перегрев трансформаторов нормальной частоты. По (94)

$$v = \sqrt[7]{\frac{1}{P_г} \left[\frac{1}{f к_1 к_с B_0} \sqrt{\frac{\rho}{к_{ок} \alpha_к \Delta\tau_к}} \right]^6} \; к_v \; см^3/ва. \qquad (190)$$

Здесь $P_г$ — габаритная мощность по (182), *ва*;

f, $\Delta\tau_к$, $к_с$, $к_{ок}$, $\alpha_к$, ρ — как в предыдущем случае;

B_0 — индукция, характеризующая материал сердечника по (86), *гс* (для горячекатаных сталей Э41—43 $B_0 = 10\,500$, для холоднокатаных сталей $B_0 = 15\,500$);

$к_1$ — коэффициент по (91):

$$к_1 = \frac{4{,}44 \times 10^{-6}}{n},$$

величина n берется в зависимости от $P_г$ по рис. 116;

$к_v$ — коэффициент геометрии по объему, определяемый для выбранного типа и геометрии (x, y, z) трансформатора по (129) и формулам табл. 26; можно также взять величину $к_v$ по рис. 92, 98, 103, 106.

Для «нормальных» сердечников (см. § 26) значения $к_v$ приведены в табл. 34.

Для «нормальных» условий (см. § 26) частоты 50 *гц* и ориентировочных значений $к_с = 0,9$; $к_{ок} = 0,3$; $n = 2,1$; $\alpha_к = 1,1 \times 10^{-3}$

$$v = 1,16 \sqrt[7]{\frac{1}{P_г} \frac{1}{\left(\frac{B_0}{10^4}\right)^6}}\, к_v. \quad (191)$$

Для средних мощностей (около 100 *ва*)

$$v = 0,6 \sqrt[7]{\left(\frac{10^4}{B_0}\right)^6}\, к_v.$$

При всех указанных допущениях и использовании холоднокатаной стали значения v приведены в табл. 34. Эти величины могут быть использованы при предварительных грубых подсчетах. При отклонении одного или нескольких условий от приведенных выше данные величины v могут быть пересчитаны в соответствии со (190), причем в первом приближении

$$v \equiv \frac{1}{f к_1 к_с B_0} \sqrt{\frac{\rho}{к_{ок} \alpha_к \Delta\tau_к} \frac{1}{\sqrt[7]{P_г}}}. \quad (192)$$

Расчет трансформаторов на заданное падение напряжения. По (101)

$$v = \sqrt[5]{\left(\frac{\rho}{к_{ок} к_с^2 B^2 f^2 (2,22 \cdot 10^{-6})^2 \Delta u}\right)^3 \frac{1}{P_г^2}}\, к_v \ см^3/ва. \quad (193)$$

Здесь $P_г$, f, $к_с$, $к_{ок}$ — как в предыдущих случаях;

B — индукция *(гс)*, определяемая для нормальной частоты по (148), а для повышенных — по (148) или (142) и рис. 109 в соответствии с указаниями в § 23. Обычно $B = (1,05—1,2)\, B_0$, где B_0 — как в предыдущем случае;

$\rho_х$ — при обычных рабочих температурах — как в предыдущих случаях, при 75°. Для высоких температур или при специальных требованиях $\rho_х$ берется при задаваемой температуре;

Δu — заданное падение напряжения в относительных единицах;

$к_v$ — коэффициент геометрии по объему, определяемый для выбранного типа и геометрии *(x, y, z)* трансформатора по (130) и формулам табл. 26.

Можно также взять величину $к_v$ по рис. 93, 99, 104, 107.

Для «нормальных» сердечников (см. § 26) величины $к_v$ для разных типов трансформаторов приведены в табл. 34.

Для «нормальных» условий (см. § 26) и $к_{ок} = 0{,}2$, $к_c = 0{,}9$

$$v = 1{,}8 \times 10^6 \sqrt[5]{\frac{1}{(f^2 \Delta u B^2)^3 P_г^2}}\, к_v. \tag{194}$$

При частоте 50 *гц* и сердечниках из холоднокатаной стали

$$v = 0{,}14 \sqrt[5]{\frac{1}{P_г^2 \Delta u^3}}\, к_v, \tag{195}$$

при сердечниках из горячекатаной стали

$$v = 0{,}21 \sqrt[5]{\frac{1}{P_г^2 \Delta u^3}}\, к_v. \tag{196}$$

Формулы (195) и (196) могут быть использованы для предварительных подсчетов. Значения v при $\Delta u = 0{,}05$, $P_г = 100$ *ва* и сердечниках из холоднокатаной стали приведены в табл. 34.

При отклонении одного или нескольких условий от приведенных выше величины v могут быть пересчитаны в соответствии со (193), причем в первом приближении

$$v = \frac{1}{к_c f B} \sqrt{\frac{1}{P_г} \cdot \frac{\rho}{к_{ок} \Delta u}}\, к_v. \tag{197}$$

Расчет трансформаторов на заданный ток намагничивания. По (104)

$$v = \frac{1}{\sqrt{P}} \sqrt{\frac{10^4 n^2}{4 i_0 f} \frac{\delta}{к_{ок}^2 j^2}}\, к_v \tag{198}$$

(справедливо только для трансформаторов малых размеров на разъемных ленточных сердечниках).

Здесь i_0 — заданный намагничивающий ток;

f, $к_{ок}$ — как ранее;

δ — эффективный зазор в магнитопроводе на один стержень, *см* (зависит от технологии изготовления сердечников, в среднем $\delta = (1-1{,}5)\, 10^{-3}$ *см*);

j — плотность тока (*а/мм*^{2}), принимаемая по (141), (152) или (161) в зависимости от заданных требований обеспечения допустимого перегрева или падения напряжения (см. рис 109—111);

$к_v$ — коэффициент геометрии по объему, определяемый для выбранного типа и геометрии (x, y, z) трансформатора по (131) и формулам табл. 26. Значения $к_v$ для «нормальных» сердечников приведены в табл. 34.

Примеры расчета.

I. Найти основные размеры сердечника тороидального трансформатора компромиссной геометрии при частоте 400 *гц* и перегреве $\Delta\tau_к = 65°$. Трансформатор с высоким потенциалом, трехобмоточный. Мощности $P_2 = 80$ *ва*, $P_3 = 120$ *ва*. Обмотка 2 предназначена для питания двухполупериодного выпрямителя со средней точкой. Сердечник — ленточный первой группы качества. Изоляция — заливкой термореактивным компаундом. Остальные условия — «нормальные». Сталь холоднокатаная.

1. По табл. 27 принимаем $x = 3$, $y = 1$.

2. Определяем исходные величины для использования (188): по (180) $P_{II} = 80 + 120 = 200$ *ва*, по рис. 112 $\eta = 0{,}96$; по (68) и табл 22 $к_{в2} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$; $к_{в3} = 1$, по (182)

$$P_г = \frac{1}{2}\left[200 + \frac{1}{0{,}96}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot 80 + 120\right)\right] = 192 \text{ ва};$$

по табл. 15 $к_с = 0{,}93$; по рис. 114 и табл. 32 $к_{ок} = 0{,}26 \cdot 0{,}55 = 0{,}14$; по рис. 115 и табл. 32 $\alpha_к = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см²·°С*; по табл. 4 $\gamma_с = 7{,}65$; $\rho = 0{,}021$ *ом·мм²/м*; $p_{10} = 9{,}5$ *вт/кг*; по (106) $\nu = \nu_0 = 1$; по табл. 26 $\varphi_{пс} = 0$ и $\beta = 0$; по (78) $\varphi_\nu = \sqrt{1} \cdot \dfrac{1+0}{1+1} = 0{,}5$. Величину $к_v$ находим по рис. 102 или вычисляем по (128) при $\varphi_э = \varphi_v$. Предварительно находим по табл. 26

$$\varphi_с = \pi \cdot 1 \cdot (3 + 1) = 12{,}6; \quad \varphi_s = 1; \quad \varphi_{ок} = \frac{1}{4}\pi \cdot 3^2 = 7{,}1;$$

$$\varphi_к = \frac{\pi}{2}\left(\frac{3}{2} + 1\right)(3^2 + 2 \cdot 3 + 2) - \pi \cdot 1\,(3 + 1) = 54{,}4;$$

$$\varphi_{пк} = \pi\sqrt{2 \cdot 3^2 + 4 \cdot 3 + 4}\left(\frac{3}{2} + 1 + \frac{1}{2}\sqrt{2 \cdot 3^2 + 4 \cdot 3 + 4}\right) = 99;$$

$$\varphi_v = 2\,(3^2 + 2 \cdot 3 + 2)\left(\frac{3}{2} + 1\right) = 85.$$

Тогда

$$к_v = 85\,\frac{\sqrt{12{,}6 \cdot 54{,}4}}{1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 7{,}1 \cdot 99} = 3{,}17.$$

По (188)

$$v = \frac{2\sqrt{2}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 65 \cdot 400}\sqrt{\frac{0{,}021 \cdot 7{,}65}{0{,}93 \cdot 0{,}13} \cdot 9{,}5 \cdot \frac{0{,}5}{0{,}5} \cdot 3{,}17} = 1{,}23 \text{ см}^3/\text{ва}.$$

3. $V = 192 \cdot 1{,}23 = 236$ *см³*.

4. $a = \sqrt[3]{\dfrac{236}{85}} = 1{,}4$ *см*. 5. $c = 3 \cdot 1{,}4 = 4{,}2$ *см*; $b = 1 \cdot 1{,}4 = 1{,}4$ *см*. При необходимости округляем: $c = 4$ *см*, $b = 1{,}5$ *см*,

$$a = 1{,}4\left(\frac{4{,}2}{4}\right)^2 \cdot \frac{1{,}4}{1{,}5} = 1{,}45 \approx 1{,}5 \text{ см}.$$

11. Найти основные размеры сердечника броневого накального низковольтного трансформатора минимальной стоимости при вторичной мощности 25 *ва* и частоте питания 50 *гц*.

Сердечник — из штампованных пластин с нормальным ярмом. Сталь Э41 0,5 *мм*. Падение напряжения не выше 10%: $\Delta u \leqslant 0{,}1$; при этом перегрев не должен превышать 45°. Катушки — бескаркасные. Все прочие условия — «нормальные».

1. По табл. 27 принимаем $x = 0{,}5$; $y = 2$; $z = 1$.

2. Исходные величины для использования (193): по рис. 112 $\eta = 0{,}83$; по (183)

$$P_г = \frac{1}{2}\left(25 + \frac{1 \cdot 25}{0{,}83}\right) = 27{,}5 \text{ ва}.$$

По табл. 13 $к_с = 0{,}94$; по рис. 114 и табл. 32 $к_{ок} = 0{,}26 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 = 0{,}2$; $\rho = 0{,}021$; $B = 12\,500$ *гс*.

Величину $к_v$ находим по рис. 93 или вычисляем по (130) при $\varphi_э = \varphi_v$.

По табл. 26 находим: $\varphi_s = 2$; $\varphi_{ок} = 0{,}5 \cdot 1 = 0{,}5$;

$$\varphi_к = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0{,}5}{2} + 2 + 1\right) = 3{,}79; \quad \varphi_v = 2\,(0{,}5 + 1) \cdot (2 \cdot 0{,}5 + 2) \cdot (1 + 1) = 18.$$

Тогда

$$к_v = 18 \cdot \sqrt[5]{\left[\frac{3{,}79}{(0{,}5 \cdot 2)^2}\right]^3} = 40.$$

По (193)

$$v = \sqrt[5]{\left(\frac{0{,}021}{0{,}2 \cdot 0{,}94^2 \cdot 12500^2 \cdot 50^2\ (2{,}22 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0{,}1}\right)^3 \frac{1}{27{,}5^2}} \cdot 40 = 10{,}5 \text{ см}^3/\text{ва}.$$

3. $V = 27{,}5 \cdot 10{,}5 = 289$ *см*³.

4. $a = \sqrt[3]{\dfrac{289}{18}} = 2{,}5$ *см*.

5. $c = 2{,}5 \cdot 0{,}5 = 1{,}25$ *см*; $b = 2{,}5 \cdot 2 = 5$ *см*; $h = 2{,}5 \cdot 1 = 2{,}5$ *см*.

Проверим величину перегрева по (46).

По (127) и табл. 26 находим:

$$\varphi_{пк} = 2\,[\pi \cdot 0{,}5\,(0{,}5 + 1) + (2 \cdot 0{,}5 + 1)] = 8{,}8;$$

$$\varphi_{пс} = 2\,[2\,(2 \cdot 0{,}5 + 1 + 3) + (2 \cdot 0{,}5 + 1 + 2)] = 28;$$

$$\beta = \frac{28}{8{,}8} = 3{,}2; \quad \varphi_с = 2 \cdot 2\,(0{,}5 + 1 + 1) = 10;$$

$$G_с = \gamma_с к_с \varphi_с a^3 = 7{,}55 \cdot 0{,}94 \cdot 10 \cdot 2{,}5^3 = 1100 \text{ г};$$

$$П_к = \varphi_{пк} a^2 = 8{,}8 \cdot 2{,}5^2 = 55 \text{ см}^2;$$

по (67) $p_с = 2{,}0 \left(\dfrac{12\,500}{10\,000}\right)^2 \cdot 1100 \cdot 10^{-3} = 3{,}5$ *вт*.

По (95) $p_к = 0{,}1 \cdot 27{,}5 = 2{,}75$ *вт*; $\nu = \dfrac{3{,}5}{2{,}75} = 1{,}3$.

По рис. 115 и табл. 32

$$\alpha_к = 1{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \cdot {}^\circ\text{C}.$$

По (46)

$$\Delta\tau_к = \frac{2{,}75 + 3{,}5}{10^{-3} \cdot 55\left(1 + 3{,}2 \cdot \sqrt{1{,}3}\right)} = 23{,}5^\circ \ll 45^\circ.$$

Условие $\Delta\tau_к \leqslant 45^\circ$ выполнено. Расчет закончен.

Определение размеров при использовании оптимальных коэффициентов заполнения. В этом случае сразу вслед за выбором параметров x, y, z (что всегда может быть сделано в начале расчета) подсчитывается отношение объемов сердечника и катушек (при полном заполнении) $\frac{V_c}{V_к} = \frac{\varphi}{\varphi_к}$ по формулам табл. 26.

По данным § 19 и рис. 86, 87 или 88 для полученного $\frac{V_c}{V_к}$ и заданных условий расчета определяются оптимальные значения $к_{ок_{опт}}$, $к_{с_{опт}}$. Если они оказались меньше, чем обычно принимаемые (см. § 26) $к_{ок}$, $к_c$, то их и следует ввести в расчет. С учетом замечания, приведенного в § 20, при расчете на заданный перегрев можно принимать еще меньшие значения $к_{ок_{опт}}$.

Как следует из указаний в § 23, плотность тока при этом можно повысить предварительно в отношении $\sqrt{\frac{к_{ок}}{к_{ок_{опт}}}}$, а индукцию — при расчете т. м. м. повышенной частоты — в отношении $\sqrt{\frac{к_c}{к_{с_{опт}}}}$.

Примеры расчета. Рассмотрим вопрос выбора оптимальных коэффициентов заполнения для примеров, приведенных выше (см. выше в настоящем параграфе).

I. К примеру I из раздела «Определение размеров через электромагнитные нагрузки».

Выбрано $x = 1{,}25$; $y = 2$; $z = 5$. Тогда по табл. 26

$$\varphi_c = 2 \cdot 2\,(1{,}25 + 5 + 2) = 33;$$

$$\varphi_к = 2 \cdot 1{,}25 \cdot 5\left(\frac{\pi}{4} \cdot 1{,}25 + 2 + 1\right) = 50;$$

отсюда

$$\frac{V_c}{V_к} = \frac{\varphi_c}{\varphi_к} = \frac{33}{50} = 0{,}64.$$

По указаниям в § 19 при 50*гц* $к_{с_{опт}} = 1 > к_c$, т. е. необходимо оставить обычную величину $к_c$.

Иначе обстоит дело с величиной $к_{ок}$. С точки зрения веса по рис. 86 $к_{ок_{опт}} = 0{,}25 - 0{,}5$. Если одновременно обратить внимание на стоимость, то по рис. 87 при $\frac{ц_к}{ц_c} = 3$ $к_{ок_{опт}} \approx 0{,}22$ (принято $ц_к = 12$ *руб/кг*; $ц_c = 4$ *руб/кг*). Следовательно, рационально принять $к_{ок_{опт}} = 0{,}25$, что даст снижение стоимости без увеличения веса. Тогда увеличим j в

$$\sqrt{\frac{к_{ок}}{к_{ок_{опт}}}} = \sqrt{\frac{0{,}34}{0{,}25}} = 1{,}16 \text{ раза.}$$

По (184)

$$s_c s_{ок} \equiv \frac{1}{к_{ок} j},$$

т. е. увеличится в $\frac{0{,}34}{0{,}25}\sqrt{\frac{1}{\frac{0{,}34}{0{,}25}}} = 1{,}16$ раза.

Значит, все линейные размеры вырастут в $\sqrt[4]{1,16} = 1,04$ раза и станут: $a = 2,85$; $b = 5,7$; $c = 3,6$; $h = 14,5$. Подсчитаем по формулам табл. 26 веса и стоимости для прежнего и нового трансформаторов:

Было ($к_{ок} = 0,34$)	Стало ($к_{ок} = 0,25$)
$G_с = 7,65 \cdot 0,92 \cdot 33 \cdot 2,75^3 = 4800$ *г* $= 4,8$ *кг*;	$G_с = 7,65 \cdot 0,92 \cdot 33 \cdot 2,85^3 = 5,4$ *кг*;
$G_к = 8,8 \cdot 0,34 \cdot 50 \cdot 2,75^3 = 3150$ *г* $= 3,15$ *кг*;	$G_к = 8,8 \cdot 0,25 \cdot 50 \cdot 2,85^3 = 2,58$ *кг*;
$G = 4,8 + 3,15 = 7,95$ *кг*;	$G = 5,4 + 2,58 = 7,98$ *кг*;
$Ц_с = 4 \cdot 4,8 = 19,2$ руб.;	$Ц_с = 4 \cdot 5,4 = 21,6$ руб.;
$Ц_к = 12 \cdot 3,15 = 38$ руб.;	$Ц_к = 12 \cdot 2,58 = 31$ руб.;
$Ц = 19,2 + 38 = 57,2$ руб.	$Ц = 21,6 + 31 = 52,6$ руб.

Как видим, минимум веса сохранился, а стоимость материалов сократилась почти на 10%. Расход меди снизился на 20%. Поскольку катушка нового трансформатора стала тоньше (за счет уменьшения сечения проводников и числа витков), то оказывается, что его габаритные размеры по ширине и толщине стали несколько меньше. Высота же несколько возросла. Габаритный объем практически остался прежним.

II. К примеру II из раздела «Определение размеров через удельный объем трнсформатора».

Выбрано $x = 0,5$; $y = 2$; $z = 1$.

По табл. 26 $\varphi_с = 2 \cdot 2\,(0,5 + 1 + 1) = 5$;

$$\varphi_к = 2 \cdot 0,5 \cdot 1 \left(\frac{\pi}{2}\,0,5 + 2 + 1\right) = 1,9; \quad \frac{V_с}{V_к} = \frac{\varphi_с}{\varphi_к} = \frac{5}{1,9} = 2,64.$$

Примем $\frac{ц_к}{ц_с} = 5$. По рис. 87 $к_{ок_{опт}} \approx 0,35$.

Практически же можно реализовать лишь величину $к_{ок} = 0,2$ (см. сам пример). Поскольку $к_{ок} < к_{ок_{опт}}$, снижать величину $к_{ок}$ не имеет смысла.

Выбор сердечника из заданного стандартного ряда. Нормализованные (межведомственные) ряды броневых, стержневых, тороидальных и трехфазных сердечников приведены в табл. 35—41. Выбор нужного сердечника из стандартного ряда может быть произведен двояким образом.

Выбор сердечника по найденным размерам. Если в соответствии с изложенным в первом разделе настоящего параграфа определены величины $s_с s_{ок}$ по (184) или a по (187) или (140), то достаточно сопоставить найденные величины с соответствующими величинами для сердечников стандартного ряда и выбрать тот сердечник, у которого эти величины ближайшие большие к найденным значениям. Для некоторых типовых случаев на основании приближенных значений v по (189), (191), (194) могут быть получены ориентировочные выражения для ширины несущего стержня трансформатора a, если для проектирования используются нормализованные ряды сердечников, приведенные в табл. 35—41.

Таблица 35

Броневые сердечники Ш из штампованных пластин с полной высотой окна—по НО. 666.000

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	*G*, *г*
I	1	Ш9×9	9	9	9	22,5	7,7	0,81	2	1,62	44
	2	12		12				1,08		2,16	59
II	3	Ш12×10	12	10	12	30	10,2	1,2	3,6	4,3	88
	4	12		12				1,45		5,2	105
	5	16		16				1,9		6,8	135
	6	20		20				2,4		8,6	175
	7	25		25				3		10,8	220
	8	32		32				3,8		13,7	282
III	9	Ш16×10	16	10	16	40	13,6	1,6	6,4	10,2	154
	10	12		12				1,9		12,1	185
	11	16		16				2,6		16,6	250
	12	20		20				3,2		20,5	310
	13	25		25				4		25,6	385
	14	32		32				5,1		32,6	490
	15	40		40				6,4		41	612
IV	16	Ш20×12	20	12	20	50	17,1	2,4	10	24	292
	17	16		16				3,2		32	390
	18	20		20				4		40	485
	19	25		25				5		50	605
	20	32		32				6,4		64	775
	21	40		40				8		80	965
	22	50		50				10		100	1200
V	23	Ш25×16	25	16	25	62,5	21,3	4	15,6	62,5	595
	24	20		20				5		78	745
	25	25		25				6,25		97,5	935
	26	32		32				8		125	1190
	27	40		40				10		156	1500
	28	50		50				12,5		195	1860
	29	63 (64)		63 (64)				16		250	2380
VI	30	Ш32×20	32	20	32	80	27,3	6,4	25,6	164	1220
	31	25		25				8		205	1530
	32	32		32				10,2		261	1950
	33	40		40				12,8		328	2450
	34	50		50				16		410	3060
	35	63		63 (64)				20,4		522	3910
	36	80		80				25,6		656	4900

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
VII	37	Ш40×25	40	25	40	100	34,2	10	40	400	2390
	38	32		32				12,8		512	3060
	39	40		40				16		640	3830
	40	50		50				20		800	4800
	41	63		63 (64)				25,6		1025	6120
	42	80		80				32		1280	7660
	43	100		100				40		1600	9560

Примечания. 1. Основные размеры — по рис. 90; s_c — геометрическое сечение. 2. Вес G_c подсчитан при $к_c$=0,9.

Таблица 36

Броневые сердечники Ш из штампованных пластин с уменьшенной высотой окна—по НО. 666.000

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
I	1	Ш12×10	12	10	12	18	8	1,2	2,2	2,6	66
	2	12		12				1,45		3,1	79
	3	16		16				1,9		4,1	101
	4	20		20				2,4		5,2	131
	5	25		25				3		6,5	165
	6	32		32				3,8		8,2	211
II	7	Ш16×10	16	10	16	24	10,6	1,6	3,8	6,1	115
	8	12		12				1,9		7,3	139
	9	16		16				2,6		10	187
	10	20		20				3,2		12,3	232
	11	25		25				4		15,4	288
	12	32		32				5,1		19,6	367
	13	40		40				6,4		24,6	460

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	b	c	h	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
	14	Ш20×12		12				2,4		14,4	219
	15	16		16				3,2		19,2	292
	16	20		20				4		24	364
III	17	25	20	25	20	30	13,3	5	6	30	453
	18	32		32				6,4		38,4	580
	19	40		40				8		48	722
	20	50		50				10		60	900
	21	Ш25×16		16				4		37,5	446
	22	20		20				5		46,8	560
	23	25		25				6,25		58,5	700
IV	24	32	25	32	25	37,5	16,6	8	9,4	75	892
	25	40		40				10		93,5	1120
	26	50		50				12,5		117	1400
	27	63 (64)		63 (64)				16		150	1780
	28	Ш32×20		20				6,4		98	915
	29	25		25				8		123	1150
	30	32		32				10,2		156	1460
V	31	40	32	40	32	48	21,3	12,8	15,3	197	1840
	32	50		50				16		246	2300
	33	63 (64)		63 (64)				20,4		313	2930
	34	80		80				25,6		394	3670
	35	Ш40×25		25				10		240	1790
	36	32		32				12,8		308	2300
	37	40		40				16		384	2870
VI	38	50	40	50	40	60	26,6	20	24	480	3600
	39	63 (64)		63 (64)				25,6		615	4580
	40	80		80				32		768	5750
	41	100		100				40		960	7160

Примечание. См. прим. к табл. 35.

Таблица 37

Броневые сердечники ШУ из штампованных пластин с уширенным ярмом—по НИО.010.005 (для низковольтных трансформаторов наименьшей стоимости на 50 *гц*)

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	b	c	h	ширина ярм	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
I	1	ШУ10×10	10	10	6,5	18	6,5	5,66	1	1,15	1,15	62
	2	15		15					1,5		1,75	93
	3	20		20					2		2,3	124
II	4	ШУ12×12	12	12	8	22	8	6,74	1,45	1,75	2,55	111
	5	18		18					2,15		3,75	167
	6	24		24					2,9		5,1	222
III	7	ШУ14×14	14	14	9	25	9	7,92	1,95	2,25	4,4	167
	8	21		21					2,95		6,65	251
	9	28		28					3,9		8,8	335
IV	10	ШУ16×16	16	16	10	28	10	9,03	2,55	2,8	7,15	240
	11	24		24					3,85		10,8	360
	12	32		32					5,1		14,3	480

Продолжение табл. 37

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	b	c	h	ширина ярм	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
V	13 14 15	ШУ19×19 28 38	19	19 28 38	12	33,5	12	10,6	3,6 5,3 7,2	4	14,4 21,2 28,8	407 610 814
VI	16 17 18	ШУ22×22 33 44	22	22 33 44	14	39	14	12,4	4,85 7,3 9,7	5,5	26,7 40,2 53,4	640 960 1280
VII	19 20 21	ШУ26×26 39 52	26	26 39 52	17	47	17	14,7	6,8 10,1 13,5	8	54,4 80,8 108	1100 1650 2200
VIII	22 23 24	ШУ30×30 45 60	30	30 45 60	19	53	19	16,9	9 13,5 18	10	90 135 180	1610 2410 3220
IX	25 26 27	ШУ35×35 52 70	35	35 52 70	22	61,5	22	19,8	12,3 18,2 24,5	13,5	166 246 332	2540 3810 5080

Примечание. См. прим. к табл. 35, но $к_c = 0,93$.

Таблица 38

Броневые ленточные разъемные сердечники ШЛ — по НО.666.002

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	b	c	h	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
I	1	ШЛ6×6,5	6	6,5	6	15	5,1	0,38	0,9	0,34	13
	2	8		8				0,48		0,43	16
	3	10		10				0,60		0,54	20
	4	12,5		12,5				0,75		0,68	25
II	5	ШЛ8×8	8	8	8	20	6,8	0,64	1,6	1,02	29
	6	10		10				0,80		1,28	36
	7	12,5		12,5				1,0		1,60	45
	8	16		16				1,28		2,04	57
III	9	ШЛ10×10	10	10	10	25	8,5	1,0	2,5	2,50	57
	10	12,5		12,5				1,25		3,12	71
	11	16		16				1,6		4	91
	12	20		20				2,0		5	113
IV	13	ШЛ12×12,5	12	12,5	12	30	10,2	1,5	3,6	5,4	100
	14	16		16				1,9		6,9	130
	15	20		20				2,4		8,7	165
	16	25		25				3,0		10,8	205

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	b	c	h	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
V	17	ШЛ16×16	16	16	16	40	13,6	2,6	6,4	16,6	235
	18	20		20				3,2		20,5	295
	19	25		25				4,0		25,6	370
	20	32		32				5,1		32,6	470
VI	21	ШЛ20×20	20	20	20	50	17,1	4,0	10,0	40	460
	22	25		25				5,0		50	575
	23	32		32				6,4		64	735
	24	40		40				8,0		80	920
VII	25	ШЛ25×25	25	25	25	62,5	21,3	6,25	15,6	98	900
	26	32		32				8,0		125	1150
	27	40		40				10,0		156	1440
	28	50		50				12,5		195	1800
VIII	29	ШЛ32×32	32	32	32	80	27,3	10,2	25,6	261	1900
	30	40		40				12,8		328	2370
	31	50		50				16,0		410	2970
	32	64		64				20,4		523	3800
IX	33	ШЛ40×40	40	40	40	100	34,2	16,0	40,0	640	3720
	34	50		50				20,0		800	4650
	35	64		64				25,6		1025	5950
	36	80		80				32,0		1280	7430

Примечания. 1. См. прим. к табл. 35.
2. Место разъема сердечника (высота h') не оговаривается (или задается факультативно).
3. Радиус закругления внутренних углов сердечника 0,5 *мм* при толщине ленты $\leqslant$0,2 *мм*, 1 *мм*—при большей толщине.
4. Вес подсчитан с учетом закруглений наружных углов сердечника.

Таблица 39

Стержневые ленточные разъемные сердечники ПЛ—по НО.666.002

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	b	c	h	h'	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
I	1	ПЛ6,5×8	6,5	12,5	8	8	3	5,2	0,81	0,64	0,52	28
	2	10				10	5	5,6		0,8	0,65	30
	3	12,5				12,5	5	6,1		1	0,81	33
	4	16				16	8	6,8		1,28	1,04	37
II	5	ПЛ8×12,5	8	12,5	10	12,5	5	6,9	1	1,25	1,25	47
	6	16				16	8	7,6		1,6	1,6	51
	7	20				20	8	8,4		2	2	57
	8	25				25	12,5	9,4		2,5	2,5	63
III	9	ПЛ10×20	10	12,5	12,5	20	18	9,6	1,25	2,5	3,1	81
	10	25				25	12,5	10,6		3,1	3,9	89
	11	32				32	12,5	11,6		4	5	98
	12	40				40	20	13,6		5	6,3	114
IV	13	ПЛ12,5××16×25	12,5	16	16	25	10	12,0	2	4	8	163
	14	16×32				32	16	13,4		5,1	10,2	182
	15	16×40				40	16	15,0		6,4	12,8	203
	16	16×50				50	25	17,0		8	16	230
V	17	ПЛ12,5×30	12,5	25	20	30	10	13,8	3,1	6	18,7	292
	18	40				40	20	15,8		8	25	334
	19	50				50	20	17,8		10	31	376
	20	60				60	30	19,8		12	37,6	418

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	*h'*	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
VI	21	ПЛ16×40	16	32	25	40	15	18,0	5,1	10	51	640
	22	50				50	25	20,0		12,5	64	710
	23	65				65	25	23,0		16,3	83	800
	24	80				80	40	26,0		20	102	920
VII	25	ПЛ20×50	20	40	32	50	20	22,7	8	16	128	1250
	26	60				60	30	24,7		19,2	154	1400
	27	80				80	30	28,7		25,6	205	1600
	28	100				100	50	32,7		32	256	1800
VIII	29	ПЛ25×65	25	50	40	65	25	28,8	12,5	26	325	2500
	30	80				80	40	31,8		32	400	2800
	31	100				100	40	35,8		40	500	3100
	32	120				120	60	39,8		48	600	3500
IX	33	ПЛ32×80	32	64	50	80	30	36,0	20,5	40	820	5100
	34	100				100	50	40,0		50	1025	5700
	35	130				130	50	46,0		65	1330	6500
	36	160				160	80	52,0		80	1640	7350
X	37	ПЛ40×100	40	80	64	100	40	45,3	32	64	2050	9900
	38	120				120	60	49,0		77	2460	10800
	39	160				160	60	57,3		102	3260	12550
	40	200				200	100	65,3		128	4100	14300

Примечание. См. прим. к табл. 38.

Таблица 40

Тороидальные ленточные сердечники ОЛ—по НО.666.002

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	b	d	D	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
I	1	ОЛ10/16-4	3	4	10	16	4	0,12	0,78	0,09	3,2
	2	5		5				0,15		0,12	4,0
	3	6,5		6,5				0,20		0,16	5,3
	4	8		8				0,24		0,19	6,5
II	5	ОЛ12/20-5	4	5	12	20	5	0,20	1,1	0,22	6,6
	6	6,5		6,5				0,26		0,29	8,8
	7	8		8				0,32		0,35	10,7
	8	10		10				0,40		0,44	13,4
III	9	ОЛ16/26-6,5	5	6,5	16	26	6,5	0,33	2,0	0,66	14,2
	10	8		8				0,40		0,80	17,6
	11	10		10				0,50		1,00	21,6
	12	12,5		12,5				0,68		1,36	27,1
IV	13	ОЛ20/32-8	6	8	20	32	8,1	0,48	3,1	1,50	25
	14	10		10				0,60		1,86	32,2
	15	12,5		12,5				0,75		2,32	40,3
	16	16		16				0,96		3,00	52,0
V	17	ОЛ25/40-10	7,5	10	25	40	10,2	0,75	4,9	3,67	51,2
	18	12,5		12,5				0,94		4,60	64
	19	16		16				1,20		5,90	82
	20	20		20				1,50		7,35	102
	21	25		25				1,87		9,18	127

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	b	d	D	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *г*
VI	22	ОЛ32/50-16	9	16	32	50	12,8	1,44	8,0	11,5	125
	23	20		20				1,80		14,4	156
	24	25		25				2,25		18,0	194
	25	32		32				2,88		23,0	249
VII	26	ОЛ40/64-20	12	20	40	64	16,3	2,4	12,6	30	264
	27	25		25				3,0		38	329
	28	32		32				3,8		48	421
	29	40		40				4,8		60	527
VIII	30	ОЛ50/80-25	15	25	50	80	20,4	3,8	19,6	75	518
	31	32		32				4,8		94	663
	32	40		40				6,0		118	829
	33	50		50				7,5		148	1035
IX	34	ОЛ64/100-32	18	32	64	100	25,8	5,8	32,2	187	1010
	35	40		40				7,2		232	1265
	36	50		50				9,0		290	1580
	37	64		64				11,5		370	2020
X	38	ОЛ80/128-40	24	40	80	128	32,6	9,6	50,2	482	2120
	39	50		50				12		603	2670
	40	64		64				15,4		775	3420
	41	80		80				19,2		965	4260

Примечания. 1. См. прим. к табл. 35.
2. Для ленты 0,35 *мм* и толще разрешается размер b принимать 30 и 60 вместо 32 и 64.
3. d — внутренний диаметр ($d=c$); D — наружный диаметр.

Таблица 41

Трехфазные ленточные разъемные сердечники ЕЛ—по НО.666.

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	b	c	h	h'	l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G'_c, *г*
	1	ЕЛ5×14				14	7	9		0,98	0,49	45
	2	×16				16	7	9,5		1,12	0,56	47
I	3	×18	5	10	14	18	9	9,8	0,5	1,25	0,63	49
	4	×21				21	9	10,5		1,47	0,74	52
	5	×24				24	12	11		1,68	0,84	55
	6	ЕЛ6,4×16				16	8	10,6		1,28	0,82	66
	7	×18				18	8	11,0		1,44	0,92	69
II	8	×20	6,4	10	16	20	10	11,4	0,64	1,60	1,03	72
	9	×23				23	10	12,0		1,84	1,18	76
	10	×26				26	13	12,6		2,08	1,33	80
	11	ЕЛ8×18				18	9	12,2		1,62	1,62	110
	12	×21				21	9	12,8		1,89	1,89	125
III	13	×24	8	12,5	18	24	12	13,4	1	2,15	2,15	131
	14	×28				28	12	14,2		2,52	2,52	138
	15	×32				32	16	15,0		2,88	2,88	148

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	*h'*	l_c, *см*	s_c, *см*²	$s_{ок}$, *см*²	$s_c s_{ок}$, *см*⁴	G'_c, *г*
IV	16	ЕЛ10×20	10	16	20	20	10	14,0	1,6	2,0	3,2	220
	17	×23				23	10	14,6		2,3	3,7	230
	18	×26				26	13	15,2		2,6	4,15	240
	19	×31				31	13	16,2		3,1	5	252
	20	×36				36	18	17,2		3,6	5,8	265
V	21	ЕЛ12,5×25	12,5	20	25	25	12,5	17,5	2,5	3,1	7,9	430
	22	×29				29	12,5	18,4		3,6	9,0	450
	23	×33				33	16,5	19,2		4,1	10,3	470
	24	×38,5				38,5	16,5	20,2		4,8	12,0	500
	25	×44				44	22	21,3		5,5	13,8	530
VI	26	ЕЛ16×32	16	25	32	32	16	22,4	4	5,1	20,4	880
	27	×37				37	16	23,4		5,9	23,6	920
	28	×42				42	21	24,4		6,7	26,8	960
	29	×49				49	21	25,8		7,9	31,6	1020
	30	×56				56	28	27,2		9,0	36,0	1080
VII	31	ЕЛ20×40	20	32	40	40	20	28	6,4	8,0	51	1720
	32	×47				47	20	29,5		9,4	60	1800
	33	×54				54	27	30,8		10,8	69	1890
	34	×62				62	27	32,5		12,4	80	2000
	35	×70				70	35	34		14,0	90	2110

Продолжение табл. 41

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*					Справочные величины				
			a	b	c	h	h'	$l_с$, *см*	$s_с$, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_с s_{ок}$, *см*^{4}	$G'_с$, *г*
	36	ЕЛ25×50				50	25	35		12,5	125	3360
	37	×58				58	25	36,6		14,5	145	3540
VIII	38	×66	25	40	50	66	33	38,2	10	16,5	165	3700
	39	×77				77	33	40,4		19,3	193	3950
	40	×88				88	44	42,6		22	220	4200
	41	ЕЛ32×64				64	32	44,8		20,5	262	5450
	42	×74				74	32	46,8		23,7	304	5750
IX	43	×84	32	40	64	84	42	48,8	12,8	26,8	344	6000
	44	×97				97	42	51,4		31,0	396	6350
	45	×110				110	55	54		35,3	453	6750

Примечания. 1. См. прим. к табл. 38.

2. Вес сердечника на фазу $G_с = \frac{1}{3} G'_с$, где $G'_с$ — по таблице.

3. ЕЛ-сердечники обозначают также ТЛ.

Находя для геометрии средних сердечников группы ряда значения φ_v по табл. 26 и используя (140), получим для «нормальных» условий (см. § 26) и конкретных значений различных коэффициентов, оговоренных выше, выражения для a, сведенные для различных случаев в табл. 42. Подчеркиваем настоятельно, что формулы таблицы дают только первое приближение к искомому результату и справедливы только для «нормальных» условий. Поэтому их можно использовать только для грубых прикидок, но ни в коем случае не для расчетов трансформаторов.

Выбор сердечника по габаритной мощности типоразмера. Такой подход к выбору сердечников, наиболее быстро приводящий к цели, возможен тогда, когда проектирование трансформаторов систематически ведется для одних и тех же конкретных условий: частоты, перегрева, материала сердечника, способа изоляции катушек и т. д. В этом случае стандартный ряд сердечников может быть заблаговременно «обсчитан»: для каждого типоразмера сердечника определяется та максимальная мощность $P_т$, которая может быть реализована при заданных условиях в трансформаторе, выполненном на этом сердечнике. Мощность $P_т$ есть габаритная мощность типоразмера. Выбор сердечника определяется простым сопоставлением величины $P_т$ и габаритной мощности рассчитываемого трансформатора $P_г$. Сердечник, для которого величина $P_т$ — ближайшая бо́льшая к $P_г$, и есть искомый.

Расчет $P_т$ ведется для каждого типоразмера по формуле (11), в которой величины $s_с$, $s_{ок}$, f известны; $\kappa_{ок}$ и $\kappa_с$ установлены практикой для данных конкретных условий или берутся оптимальными (см. § 26), n берется по указаниям в § 26, j и B рассчитываются для данного типоразмера тем или иным способом в зависимости от задачи расчета. Ход расчета j и B показан ниже, в § 28. Рассчитанные подобным способом мощности $P_т$ для «нормальных» условий (см. § 26) и стандартных типоразмеров сердечников всех типов приведены в таблицах рядов 43—49. В таблицах приведены также все использованные для вычислений величины: $\alpha_к$, $\kappa_{ок}$, $\kappa_с$, j, B.

Пересчет величин $P_т$ на другие условия, отличные от «нормальных», может быть произведен в соответствии с формулами в § 18 для расчета на перегрев при повышенных частотах — (77), то же при нормальной частоте — (90), при заданном падении напряжения — (98). Пересчетные коэффициенты, на которые следует умножить $P_т$ при переходе к другим условиям можно получить по табл. 50 как произведение аналогичных коэффициентов для j и B.

Зависимости мощности $P_т$ от величины перегрева в широком диапазоне его значений для типоразмеров ряда стержневых

Таблица 42

Зависимость ширины стержня *a* низковольтных т. м. м. от мощности при «нормальных условиях» (только для ориентировочных расчетов)

Тип трансформатора		$\Delta\tau_к = 50°$		$\Delta u = \mathrm{const}$		
				В общем виде	при $\Delta u = 0{,}05$	
		400 *гц*	50 *гц*		400 *гц*	50 *гц*
Броневой		$0{,}28\sqrt[3]{P}$	$0{,}47\sqrt[3]{P}$	$10{,}2\dfrac{\sqrt[3]{P}}{\sqrt[5]{\Delta u^3 f^6}}$	$0{,}047\sqrt[3]{P}$	$0{,}56\sqrt[3]{P}$
Стержневой	$a \leqslant 1{,}2$	$0{,}25\sqrt[3]{P}$	$0{,}43\sqrt[3]{P}$	$9{,}6\dfrac{\sqrt[3]{P}}{\sqrt[5]{\Delta u^3 f^6}}$	$0{,}045\sqrt[3]{P}$	$0{,}53\sqrt[3]{P}$
	$a \geqslant 1{,}2$	$0{,}21\sqrt[3]{P}$	$0{,}35\sqrt[3]{P}$	—	—	—
Тороидальный		$0{,}19\sqrt[3]{P}$	$0{,}34\sqrt[3]{P}$	$7{,}3\dfrac{\sqrt[3]{P}}{\sqrt[5]{\Delta u^3 f^6}}$	$0{,}034\sqrt[3]{P}$	$0{,}4\sqrt[3]{P}$
Трехфазный		$0{,}19\sqrt[3]{P}$	$0{,}35\sqrt[3]{P}$	$8\dfrac{\sqrt[3]{P}}{\sqrt[5]{\Delta u^3 f^6}}$	$0{,}036\sqrt[3]{P}$	$0{,}43\sqrt[3]{P}$

Примечания. 1. При использовании холоднокатаной стали величину *a* округлять в меньшую сторону, горячекатаной — в большую.
2. Данные приведены для условия возможно полного заполнения окна сердечника медью и сердечника—сталью.

Таблица 43

К расчету броневых трансформаторов на Ш-образных сердечниках по табл. 35

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°С*			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $к_с = 0{,}91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $к_с = 0{,}85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
1	Ш9×9	0,22	0,19	—	1,25	1,1	1,15	10	5,3	—	1,6	1,4	—	13	13	—	5,1	—	16,2	14	—
2	12								5,2		2,1	1,8							21,5	19	
3	Ш12×10	0,27	0,23	0,1	1	0,85	0,9	11	3,9	6,1	4,4	3,8	2,5	13	13	13	3,6	5,6	39	33	22
4	12								3,8	5,9	5,4	4,6	3,1	13	13	13	3,4	5,4	47	40	27
5	16								3,7	5,7	6,7	5,7	3,8	13	13	13	3,2	5,2	57	48	32
6	20								3,6	5,5	8,2	7,0	4,7	13	12,6	13	3,1	5,0	68	58	38
7	25								3,5	5,4	10,0	8,5	5,8	12,9	11,9	12,3	3	4,8	83	70	46
8	32								3,4	5,3	12,3	10,5	7,1	12,1	11,1	11,5	3	4,7	99	83	55
9	Ш16×10	0,29	0,25	0,12	0,95	0,8	0,85	12,5	3,2	4,7	11,4	9,8	7	13	13	13	2,9	4,3	83	72	50
10	12								3,1	4,5	14	12	8,6	13	12,4	12,8	2,7	4,1	91	79	55
11	16								3,0	4,4	17	14,5	10,6	12,7	11,7	12,1	2,5	3,9	113	98	68
12	20								2,9	4,3	21	18	13	12	11	11,4	2,5	3,8	133	115	80
13	25								2,8	4,2	26	22	16	11,4	10,5	10,9	2,5	3,7	156	135	94
14	32								2,7	4,1	32	27	20	10,8	10	10,3	2,4	3,6	183	158	110
15	40								2,7	4	38,5	33	24	10,2	9,4	9,7	2,4	3,5	215	185	130

Продолжение табл. 43

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$k_{ок}$			$10^3 a_к$, $вт/см^2 \cdot {}^\circ C$			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $k_c = 0{,}91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $k_c = 0{,}85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
16	Ш20×12								2,7	3,6	23	20	15,5	11,9	11	11,3	2,1	2,8	135	110	86
17	16								2,6	3,5	28	24	19	11,4	10,5	10,9	2,1	2,8	160	130	103
18	20	0,3	0,26	0,15	0,85	0,75	0,8	12,5	2,6	3,4	35	30	24	10,9	10,1	10,4	2,1	2,8	190	155	122
19	25								2,5	3,3	44	38	30	10,3	9,5	9,8	2,1	2,8	225	185	145
20	32								2,4	3,2	55	47	37	9,7	8,9	9,3	2	2,7	270	220	172
21	40								2,3	3,1	67	57	45	9,2	8,5	8,8	2	2,7	320	260	202
22	50								2,3	3,1	83	71	55	8,7	8	8,3	2	2,7	380	310	245
23	Ш25×16								2,3	2,9	56	48	40	10,4	9,6	9,9	1,8	2,3	285	230	190
24	20								2,3	2,8	69	59	49	9,9	9,1	9,4	1,8	2,3	340	270	225
25	25	0,32	0,27	0,18	0,8	0,7	0,75	12,5	2,2	2,8	85	72	61	9,4	8,7	8,9	1,8	2,2	400	320	265
26	32								2,2	2,7	103	88	75	9	8,3	8,5	1,8	2,2	470	380	310
27	40								2,1	2,7	127	108	93	8,5	7,8	8,0	1,7	2,2	560	450	370
28	50								2	2,6	157	134	115	8,0	7,4	7,6	1,7	2,1	660	530	440
29	63(64)								2	2,5	195	166	140	7,5	6,9	7,2	1,7	2,1	770	630	520
30	Ш32×20								1,9	2,3	132	116	100	8,9	8,2	8,5	1,5	1,8	565	460	410
31	25								1,8	2,2	161	142	122	8,5	7,8	8,1	1,5	1,8	670	540	480
32	32	0,34	0,3	0,22	0,75	0,65	0,7	12,5	1,8	2,1	196	173	150	8,1	7,5	7,7	1,5	1,8	790	640	570

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, $вт/см^2 \cdot °C$			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $к_с = 0{,}91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $к_с = 0{,}85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
33	40								1,7	2,1	240	212	185	7,7	7,1	7,3	1,5	1,8	930	760	670
34	50								1,7	2,0	292	260	230	7,3	6,7	6,9	1,4	1,6	1100	890	790
35	63(64)								1,6	2,0	360	320	280	6,9	6,4	6,5	1,4	1,6	1300	1050	930
36	80								1,6	1,9	450	400	350	6,5	6,0	6,2	1,4	1,6	1530	1240	1100
37	Ш40×25								1,6	1,9	305	270	235	7,9	7,3	7,5	1,3	1,5	1180	960	860
38	32								1,6	1,9	376	330	290	7,5	6,9	7,1	1,3	1,5	1400	1130	1020
39	40	0,38	0,33	0,25	0,75	0,65	0,7	12,5	1,5	1,8	465	410	360	7,1	6,6	6,7	1,25	1,5	1650	1350	1200
40	50								1,5	1,8	575	500	440	6,8	6,3	6,3	1,25	1,5	1950	1600	1400
41	63(64)								1,5	1,7	710	620	540	6,4	5,9	6	1,25	1,5	2300	1900	1650
42	80								1,4	1,7	875	760	660	6,1	5,6	5,7	1,2	1,4	2700	2200	1950
43	100								1,4	1,6	1070	930	830	5,7	5,2	5,4	1,2	1,4	3200	2600	2300

Примечания. 1. Принято $\Delta\tau_к = 50°$.

2. Данные для электрического расчета приведены для „нормальных" условий и трех случаев по виду изоляции катушек (см. § 26), обозначенных полужирным шрифтом:

1 — низковольтные трансформаторы „с малым количеством изоляции",
2 — „ „ „с большим количеством изоляции",
3 — высоковольтные трансформаторы с заливкой катушек термореактивным компаундом.

3. Значения $к_{ок}$, *j*, $P_т$ для частот 50 и 400 *гц* даны из условия полного заполнения окна катушкой; при частоте 400 *гц* значения $к_с$, *B*, $P_т$ подсчитаны, кроме того, из условия возможно полного заполнения сердечника сталью.

Таблица 44

К расчету броневых трансформаторов на Ш-образных сердечниках по табл. 36

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \sigma_к$, $вт/см^2 \cdot °C$			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $к_с = 0,91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $к_с = 0,85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
1	Ш12×10								5	7,1	2,8	2,4	1,8	13	13	13	4,6	6,5	24	21	15
2	12								4,8	6,9	3,4	2,9	2,2	13	13	13	4,5	6,3	29	26	18
3	16	0,22	0,19	0,1	1	0,85	0,9	11	4,6	6,7	4,2	3,6	2,7	13	13	13	4,3	6,1	35	31	22
4	20								4,5	6,5	5,1	4,4	3,3	13	13	13	4,2	5,9	42	37	27
5	25								4,4	6,3	6,2	5,3	4,0	13	13	13	4	5,7	51	45	33
6	32								4,3	6,1	7,6	6,5	4,9	13	13	13	3,8	5,4	62	55	40
7	Ш16×10								4	6	7,3	6,3	4,4	13	13	13	3,6	5,4	51,5	43	31
8	12								3,9	5,8	9	7,7	5,4	13	13	13	3,4	5,2	62	52	37
9	16								3,8	5,6	11	9,5	6,6	13	12,4	12,8	3,2	5,0	74	62	45
10	20	0,25	0,21	0,1	0,95	0,8	0,85	12,5	3,7	5,4	13,5	11,6	8,1	12,8	11,8	12,2	3,1	4,8	89	74	53
11	25								3,6	5,3	16,5	14,2	10	12,2	11,2	11,6	3,1	4,7	105	87	63
12	32								3,5	5,2	20	17	12,2	11,6	10,7	11	3	4,6	124	103	74
13	40								3,4	5,1	25	21	15	11	10,1	10,5	3	4,5	146	122	87

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$k_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°C*			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $k_c = 0{,}91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $k_c = 0{,}85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
14	Ш20×12								3,2	4,7	15,5	13	10	12,3	11,3	11,7	2,5	3,6	93	74	55
15	16								3,1	4,6	19,3	17	12	11,8	10,9	11,2	2,5	3,6	112	89	66
16	20								3,1	4,5	24	21	15	11,3	10,4	10,7	2,5	3,6	135	107	79
17	25								3	4,4	30	26	19	10,8	10	10,2	2,5	3,6	162	128	95
18	32	0,28	0,24	0,12	0,85	0,75	0,85	12,5	3	4,3	37	32	23	10,3	9,5	9,7	2,4	3,5	195	153	114
19	40								2,9	4,2	47	40	28	9,8	9	9,3	2,4	3,5	235	183	137
20	50								2,8	4,1	57	49	35	9,3	8,6	8,9	2,4	3,5	280	220	165
21	Ш25×16								2,7	3,6	37	32	25	10,7	9,9	10,2	2,1	2,8	192	154	120
22	20								2,7	3,5	45	39	31	10,3	9,5	9,8	2,1	2,8	230	185	145
23	25								2,6	3,4	56	49	39	9,9	9,1	9,4	2,1	2,8	275	220	170
24	32	0,3	0,26	0,15	0,8	0,7	0,75	12,5	2,5	3,4	69	60	48	9,4	8,7	9	2,1	2,8	330	260	200
25	40								2,5	3,3	85	74	60	9	8,3	8,6	2	2,7	390	310	240
26	50								2,4	3,2	104	90	72	8,5	7,9	8,2	2	2,7	470	370	290
27	63(64)								2,3	3,1	125	108	84	8,1	7,5	7,7	2	2,7	555	440	345

Продолжение табл. 44

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°C*			50 *гц* (сталь Э42 0,35; $к_с = 0,91$)						400 *гц* (сталь Э44 0,2; $к_с = 0,85$)							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
28	Ш32×20								2,2	2,8	90	80	64	9,2	8,5	8,7	1,7	2,2	385	310	250
29	25								2,2	2,7	110	96	79	8,8	8,1	8,3	1,7	2,2	460	370	300
30	32	0,33	0,29	0,18	0,75	0,65	0,7	12,5	2,1	2,6	134	118	98	8,4	7,7	7,9	1,7	2,2	560	440	360
31	40								2	2,6	163	144	120	8	7,4	7,5	1,7	2,2	670	530	430
32	50								1,9	2,5	200	176	148	7,7	7	7,2	1,6	2,1	800	640	520
33	63(64)								1,8	2,4	240	212	180	7,3	6,7	6,9	1,6	2,1	960	760	620
34	80								1,8	2,3	294	260	210	6,9	6,4	6,6	1,6	2	1150	910	740
35	Ш40×25								1,8	2,2	200	176	146	8,2	7,6	7,8	1,5	1,9	830	680	580
36	32								1,8	2,2	245	217	180	7,8	7,2	7,4	1,5	1,8	1000	820	700
37	40								1,8	2,2	305	270	225	7,5	6,9	7,1	1,5	1,8	1200	980	830
38	50	0,37	0,33	0,22	0,75	0,65	0,7	12,5	1,7	2,1	375	330	280	7,2	6,6	6,8	1,5	1,8	1450	1170	1000
39	63(64)								1,7	2,1	460	410	350	6,8	6,3	6,5	1,4	1,7	1750	1400	1200
40	80								1,6	2	570	500	420	6,5	6	6,2	1,4	1,7	2100	1700	1450
41	100								1,6	2	710	630	520	6,2	5,7	5,9	1,4	1,7	2500	2000	1750

Примечание. См. прим. к табл. 43.

Таблица 45

К расчету броневых трансформаторов на ШУ-сердечниках по табл. 37

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета (сталь Э41 0,5 *мм*)				
		$K_{ок}$	$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°C*	*B*, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*	$P_т$, *ва*
1 2 3	ШУ10 × 10 15 20	0,13	1,6	11,5	9,5 9,4 9,3	1,4 2,0 2,7
4 5 6	ШУ12 × 12 18 24	0,15	1,4	12	8 7,8 7,7	3,2 4,9 6,4
7 8 9	ШУ14 × 14 21 28	0,17	1,3	12,5	6,9 6,8 6,7	6,4 9 11
10 11 12	ШУ16 × 16 24 32	0,19	1,25	13	6 5,8 5,7	11 15 19
13 14 15	ШУ19 × 19 28 38	0,21	1	13,5	4,6 4,5 4,4	19 27 34
16 17 18	ШУ22 × 22 33 44	0,22	0,95	13,5	4,1 3,9 3,8	34 46 60
19 20 21	ШУ26 × 26 39 52	0,23	0,9	13,5	3,6 3,5 3,4	60 85 105
22 23 24	ШУ30 × 30 45 60	0,25	0,85	13,5	3,1 3,0 2,8	105 140 170
25 26 27	ШУ35 × 35 52 70	0,27	0,8	13,5	2,6 2,5 2,4	170 220 290

Примечание. См. прим. к табл. 43, изоляция — по случаю 1.

К расчету броневых трансформаторов на

№ сердечника	Обозначение сердечника	$k_{ок}$ $\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$			$10^3 \alpha_к$, $вт/см^2 \cdot {}^\circ C$			Данные для 50 гц, B, тыс. гс	j, $а/мм^2$	
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3
1 2 3 4	ШЛ6×6,5 8 10 12,5	0,11 / 0,17	0,08 / 0,13	—	1,7	1,4	1,5	13	По величине Δu	—
5 6 7 8	ШЛ8×8 10 12,5 16	0,15 / 0,20	0,13 / 0,17	—	1,4	1,2	1,25	14	По величине Δu	—
9 10 11 12	ШЛ10×10 12,5 16 20	0,19 / 0,22	0,16 / 0,19	—	1,25	1,1	1,15	15	По величине Δu	—
13 14 15 16	ШЛ12×12,5 16 20 25	0,27	0,23	0,1	1	0,85	0,9	16	3,8 3,7 3,6 3,5	6,0 5,8 5,6 5,5
17 18 19 20	ШЛ16×16 20 25 32	0,29	0,25	0,12	0,95	0,8	0,85	17	3 2,9 2,8 2,7	4,5 4,3 4,1 4
21 22 23 24	ШЛ20×20 25 32 40	0,3	0,26	0,15	0,85	0,75	0,8	17	2,6 2,5 2,4 2,3	3,5 3,3 3,2 3,1
25 26 27 28	ШЛ25×25 32 40 50	0,32	0,27	0,18	0,8	0,7	0,75	17	2,2 2,2 2,1 2	2,8 2,7 2,6 2,5

ленточных сердечниках по табл. 38

электрического расчета										
$\kappa_c = 0{,}92$			400 *гц*, $\kappa_c = 0{,}9$							
$P_т$, *ва*			*B*, тыс *гс*			*j*, *а/мм*^{2}		$P_т$, *ва*		
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1** и 2	**3**	**1**	**2**	**3**
По величине Δ*u*	По величине Δ*u*	—	16	16	—	8,8 8,6 8,4 8,3	—	6 7,4 9,1 11,2	4,6 5,7 7,0 8,6	—
		—	16	16	—	6,2 6 5,9 5,8	—	15 18,5 23 28	12,5 15,5 19 23,5	—
		—	16	16	—	4,7 4,6 4,6 4,5	—	32 40 49 60	28 34 42 52	—
8,4 10,6 12,8 15,4	7,2 8,8 10,8 13,2	4,9 6 7,3 9,0	16 16 15,9 15	16 15,6 14,7 13,8	16 16 15,1 14,3	3,3 3,2 3,1 3	5,2 5,0 4,8 4,7	60 72 85 101	52 62 74 88	33 39 47 56
24 29 35 44	20 25 30 38	15 18 22 27	14,8 14 13,3 12,6	13,7 13,0 12,3 11,6	14,1 13,4 12,7 12,0	2,5 2,5 2,4 2,4	3,7 3,6 3,6 3,5	142 168 198 234	103 122 144 170	82 97 114 135
52 63 76 92	44 54 65 79	35 42 51 62	12,7 12 11,3 10,7	11,7 11,1 10,5 9,9	12,1 11,5 10,9 10,2	2,1 2,1 2 2	2,8 2,8 2,7 2,7	256 300 350 410	204 240 280 330	163 190 220 260
116 141 172 210	98 120 147 180	84 100 125 150	11 10,4 9,8 9,3	10,1 9,6 9,1 8,6	10,5 10,0 9,4 8,8	1,8 1,8 1,7 1,7	2,3 2,3 2,2 2,1	500 580 680 790	400 470 540 630	335 390 460 530

№ сердечника	Обозначение сердечника	$K_{ок}$ $\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°С*			Данные для 50 *гц*,		
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*	
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3
29	ШЛ32×32	0,34	0,3	0,22	0,75	0,65	0,7	17	1,8	2,1
30	40								1,7	2,0
31	50								1,6	1,9
32	64								1,5	1,8
33	ШЛ40×40	0,38	0,33	0,25	0,75	0,65	0,7	17	1,5	1,8
34	50								1,5	1,7
35	64								1,4	1,7
36	80								1,4	1,65

Примечания. 1. См. прим. к табл. 43.
2. Данные рассчитаны для сердечников из холоднокатаной стали Э3...
3. Для частоты 50 *гц* при мощностях $P_т$ менее 150—200 *вт* индукцию пряжение может превышать номинальное значение более чем на 5%.

К расчету стержневых трансформаторов

№ сердечника	Обозначение сердечника	$K_{ок}$ $\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°С*			Данные для		
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*	
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3
1	ПЛ6,5×8	0,12/0,18	0,1/0,15	—	2	1,7	1,8	12	По величине Δu	—
2	10									
3	12,5									
4	16									
5	ПЛ8×12,5	0,15/0,2	0,13/0,17	—	1,7	1,5	1,6	13,5		—
6	16									
7	20									
8	25									

электрического расчета										
$к_c=0,92$			400 *гц*, $к_c=0,9$							
$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм*²		$P_т$, *ва*		
1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
280 330 390 460	250 290 350 410	215 250 300 350	9,4 8,9 8,4 8	8,7 8,3 7,9 7,4	8,9 8,5 8,1 7,6	1,5 1,5 1,4 1,4	1,8 1,7 1,7 1,6	1000 1160 1350 1570	820 960 1110 1300	725 850 990 1160
630 780 970 1200	550 680 840 1050	490 600 750 920	8,3 7,9 7,5 7,1	7,7 7,4 7,0 6,6	7,9 7,6 7,2 6,8	1,25 1,25 1,25 1,2	1,5 1,5 1,5 1,4	2020 2400 2800 3320	1600 1900 2250 2650	1470 1730 2050 2400

второй группы качества по табл. 17.
B следует ограничивать величиной 16 000 *гс*, если в условиях эксплуатации питающее на
При этом $P_т$ уменьшаются в 1,06 раза.

Таблица 47

на ленточных сердечниках по табл. 39

электрического расчета										
50 *гц*, $к_c=0,92$			400 *гц*, $к_c=0,9$							
$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм*²		$P_т$, *ва*		
1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
По величине Δu	По величине Δu	—	16	16	—	11 10,2 9,6 8,9	—	10,5 12,5 15,5 19	9 10,5 13 16	—
		—	16	16	—	8 7,5 7,1 6,5	—	23 28 33 39	20 24 28 33	—

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для								
		$K_{ок}$ $\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см*$^2 \cdot$°C			*B*, тыс. *гс*	*j*, *а/мм*^{2}	
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3
9 10 11 12	ПЛ10×20 25 32 40	$\frac{0,2}{0,25}$	$\frac{0,17}{0,21}$	—	1,5	1,3	1,4	15 15 15 16	7 6,7 6,5 6,2	—
13 14 15 16	ПЛ12,5×16×25 16×32 16×40 16×50	$\frac{0,25}{0,28}$	$\frac{0,21}{0,24}$	0,1	1,25	1,1	1,15	16 17 17 17	5,2 4,8 4,6 4,5	7,9 7,3 7,0 6,8
17 18 19 20	ПЛ12,5×30 40 50 60	0,28	0,24	0,12	1,15	1	1,05	17	4 3,8 3,7 3,7	5,8 5,6 5,5 5,4
21 22 23 24	ПЛ16×40 50 65 80	0,28	0,24	0,15	1,1	0,95	1	17	3,4 3,4 3,2 3	4,4 4,3 4,1 3,9
25 26 27 28	ПЛ20×50 60 80 100	0,3	0,25	0,18	1	0,85	0,9	17	2,8 2,6 2,6 2,4	3,4 3,1 3,1 2,9
29 30 31 32	ПЛ25×65 80 100 120	0,35	0,3	0,22	0,9	0,75	0,8	17	2,1 2 1,9 1,9	2,5 2,4 2,3 2,3
33 34 35 36	ПЛ32×80 100 130 160	0,35	0,3	0,22	0,9	0,75	0,8	17	1,8 1,7 1,7 1,6	2,2 2,0 2,0 1,9
37 38 39 40	ПЛ40×100 120 160 200	0,35	0,3	0,22	0,9	0,75	0,8	17	1,5 1,4 1,4 1,3	1,8 1,7 1,7 1,6

Примечание. См. прим. к табл. 46.

электрического расчета										
50 *гц*, $к_с = 0,92$			400 *гц*, $к_с = 0,9$							
$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм*²		$P_т$, *ва*		
1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
6,5	5,5	—	16	16	—	5,6	—	53	45	—
8,1	7					5,3		64	54	
10	9					5		78	66	
13	11					4,8		94	80	
16	14	10	15	14,5	15	3,9	6,2	97	80	52
20	17	12				3,6	5,7	120	100	65
24	20	15				3,5	5,6	145	120	78
30	25	18				3,5	5,6	180	145	97
39	33	30	14,4	13,3	13,6	2,8	4	180	145	105
46	39	36	14	13	13,3	2,8	4	215	175	130
56	47	44	13,5	12,5	12,8	2,7	3,9	255	200	150
68	58	53	13	12	12,3	2,7	3,9	290	230	170
83	70	58	12,4	11,4	11,7	2,4	3,1	340	270	225
110	90	76	12	11	11,3	2,4	3,1	410	320	270
125	105	87	11,8	10,9	11,2	2,3	3	510	400	340
145	120	100	11,3	10,4	10,7	2,3	3	600	470	400
180	150	130	10,6	9,8	10,1	2	2,5	650	510	450
200	170	145	10,2	9,4	9,7	2	2,4	750	590	525
270	230	200	10	9,2	9,5	1,9	2,3	940	740	660
310	260	230	9,6	8,8	9,1	1,8	2,2	1060	830	740
400	340	300	9	8,3	8,5	1,6	1,9	1300	1000	930
475	400	360	8,8	8,1	8,3	1,5	1,8	1470	1150	1050
565	480	420	8,6	7,9	8,1	1,5	1,8	1800	1400	1300
675	570	500	8,2	7,5	7,7	1,5	1,8	2060	1600	1470
870	740	650	8	7,4	7,6	1,4	1,7	2540	2000	1800
1030	880	770	7,6	7	7,2	1,4	1,7	3000	2350	2150
1330	1130	1000	7,5	6,9	7,1	1,3	1,6	3600	2800	2600
1540	1300	1150	7,2	6,7	6,8	1,3	1,6	4240	3300	3000
1820	1550	1360	7,2	6,7	6,8	1,3	1,6	5300	4150	3800
2050	1750	1530	6,9	6,4	6,5	1,2	1,5	5650	4400	4050
2720	2300	2000	6,7	6,2	6,4	1,2	1,4	7100	5600	5100
3200	2700	2400	6,4	5,9	6,1	1,2	1,4	8500	6700	6100

Таблица 48

К расчету тороидальных трансформаторов на ленточных сердечниках по табл. 40

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета												
		$к_{ок}\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$		$10^3 \alpha_к$, $вт/см^2 \cdot {}^\circ C$		$f = 50$ *гц*, $к_c = 0,93$				$f = 400$ *гц*, $к_c = 0,93$				
						B, тыс. *гс*	*j*, $а/мм^2$	$P_т$, *ва*		*B*, тыс. *гс*		*j*, $а/мм^2$	$P_т$, *ва*	
		1	2	1	2	1—2	1—2	1	2	1	2	1—2	1	2
1	ОЛ10/16-4	$\frac{0,06}{0,1}$	$\frac{0,04}{0,07}$	2,3	2	12	По величине Δ*u*	По величине Δ*u*	По величине Δ*u*	17	17	16	1,6	1
2	5											15	2,0	1,2
3	6,5											14	2,4	1,5
4	8											14	3,0	1,9
5	ОЛ12/20-5	$\frac{0,08}{0,14}$	$\frac{0,05}{0,11}$	2	1,7	13				17	17	11	4,3	3,4
6	6,5											11	5,3	4,2
7	8											10	6,4	5,1
8	10											10	7,8	6,2
9	ОЛ16/26-6,5	$\frac{0,1}{0,16}$	$\frac{0,08}{0,13}$	1,7	1,5	14				17	17	8,5	11,8	9,6
10	8											8	14,1	11,5
11	10											7,5	17,0	13,8
12	12,5											7	20,5	16,5
13	ОЛ20/32-8	$\frac{0,13}{0,18}$	$\frac{0,11}{0,15}$	1,5	1,3	15				17	17	6,5	23,5	19,5
14	10											6,2	28	23,5
15	12,5											5,9	34	28
16	16											5,6	41	34

Продолжение табл 48

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета												
		$к_{ок}\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$		$10^3 \gamma_к$, *вт/см²·°C*		$f = 50$ *гц*, $к_с = 0{,}93$				$f = 400$ *гц*, $к_с = 0{,}93$				
						B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*	$P_т$, *ва*		*B*, тыс. *гс*		*j*, *а/мм²*	$P_т$, *ва*	
		1	2	1	2	1—2	1—2	1	2	1	2	1—2	1	2
17	ОЛ25/40-10	$\frac{0{,}17}{0{,}22}$	$\frac{0{,}15}{0{,}18}$	1,3	1,1	16,5	6,1	6,1	5,4	17	17	4,5	49	40
18	12,5						6,0	7,6	6,7	17	17	4,2	57	47
19	16						6,0	9,5	8,4	17	16,8	3,9	67	55
20	20						5,9	11,8	10,5	16,7	15,5	3,8	78	64
21	25						5,8	14,5	12,8	15,3	14,2	3,7	91	75
22	ОЛ32/50-16	$\frac{0{,}22}{0{,}24}$	$\frac{0{,}18}{0{,}21}$	1,1	0,95	17,5	4,3	18,7	15,3	14,7	13,6	3	98	79
23	20						4,2	23	19	14,1	13	3	117	95
24	25						4,2	29	24	13,5	12,4	2,9	140	114
25	32						4,1	36	29,5	12,8	11,8	2,9	168	137
26	ОЛ40/64-20	0,25	0,22	1	0,85	17,5	3,4	44	39	13,5	12,5	2,5	208	167
27	25						3,3	55	48	12,5	11,6	2,5	240	190
28	32						3,3	68	60	11,5	10,7	2,4	280	220
29	40						3,2	83	73	10,6	9,8	2,4	320	250

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета												
		$к_{ок}\left(\frac{50\ гц}{400\ гц}\right)$		$10^3\tau_к$, $вт/см^2\cdot{}^\circ C$		$f = 50$ *гц*, $к_с = 0{,}93$				$f = 400$ *гц*, $к_с = 0{,}93$				
						B, тыс. *гс*	*j*, $а/мм^2$	$P_т$, *ва*		*B*, тыс. *гс*		*j*, $а/мм^2$	$P_т$, *ва*	
		1	2	1	2	1—2	1—2	1	2	1	2	1—2	1	2
30	ОЛ50/80-25	0,26	0,23	0,9	0,8	17,5	2,8	99	87	11,5	10,6	2,1	386	310
31	32						2,7	121	106	10,6	9,9	2,1	440	350
32	40						2,7	148	130	9,8	9,2	2	500	400
33	50						2,6	181	160	9	8,3	2	570	450
34	ОЛ64/100-32	0,28	0,24	0,8	0,7	17,5	2,3	218	186	9,2	8,5	1,6	630	505
35	40						2,2	261	223	8,7	8,1	1,6	730	590
36	50						2,1	313	268	8,2	7,7	1,5	850	680
37	64						2	375	321	7,8	7,2	1,5	990	790
38	ОЛ80/128-40	0,3	0,26	0,7	0,6	17,5	1,7	440	380	8,1	7,5	1,4	1340	1080
39	50						1,6	530	460	7,5	7,0	1,4	1520	1220
40	64						1,6	650	560	6,9	6,4	1,3	1720	1380
41	80						1,5	780	675	6,3	5,8	1,3	1950	1580

Примечания. 1. См. прим. к табл. 43 и прим. 3 к табл. 46 (последнее распространяется на сердечники № 17—30 при частоте 50 *гц* и № 1—20 при частоте 400 *гц*).

2. Данные рассчитаны для сердечников из холоднокатаной стали Э3 . . . . первой группы качества по табл. 17.

Таблица 49

К расчету трехфазных трансформаторов на ленточных сердечниках по табл. 41

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 a_к$, *вт/см²·°С*			50 *гц*, $к_c = 0{,}92$						400 *гц*, $к_c = 0{,}9$							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
1	ЕЛ5×14																6,2		21	17,8	
2	16																6,1		24	20	
3	18	0,2	0,17	—	1,6	1,4	—	14	По величине Δ*u*	—	По величине Δ*u*	По величине Δ*u*	—	16	16	—	6,0	—	26	22	—
4	21																5,9		30	25	
5	24																5,8		33	28	
6	ЕЛ6,4×16																5,3		35	30	
7	18																5,2		39	33	
8	20	0,22	0,19	—	1,5	1,3	—	15		—			—	16	16	—	5,1	—	43	37	—
9	23																5,0		48	41	
10	26																4,9		53	45	
11	ЕЛ8×18								4,9	7,4	9,8	8,2	5,9				4,4	6,6	66	56	38
12	21								4,8	7,2	11,0	9,3	6,7				4,2	6,4	74	63	43
13	24	0,25	0,21	0,1	1,35	1,15	1,2	16	4,7	7,0	12,5	10,5	7,5	16	16	16	4,1	6,2	83	71	48
14	28								4,6	6,9	14,1	11,9	8,6				4,0	6,0	93	79	54
15	32								4,5	6,8	16	13,5	9,7				3,9	5,9	104	89	61

Продолжение табл. 49

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°С*			50 *гц*, $к_с = 0{,}92$						400 *гц*, $к_с = 0{,}9$							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
16	ЕЛ10×20								4,5	6,8	18,8	15,8	11,1				3,6	5,5	110	92	61
17	23								4,4	6,6	21,2	17,9	12,5				3,5	5,3	125	104	69
18	26	0,26	0,22	0,1	1,25	1,05	1,1	17	4,3	6,4	24	20	14,2	16	16	16	3,4	5,1	141	117	78
19	31								4,2	6,2	27	23	16				3,3	5,0	160	132	88
20	36								4,0	6,1	30,5	26	18				3,2	4,9	181	150	100
21	ЕЛ12,5×25								3,7	5,5	40	34	24	15,3	14,2	14,5	2,7	4,0	212	165	95
22	29								3,6	5,3	45	38	27	15,1	14,1	14,4	2,7	3,9	240	185	108
23	33	0,27	0,23	0,11	1,15	0,95	1,05	17	3,5	5,1	51	43	30	15	14,0	14,3	2,6	3,8	270	210	120
24	38,5								3,4	5,0	57	48	34	14,9	13,8	14,2	2,5	3,8	300	230	135
25	44								3,3	4,9	63	53	38	14,8	13,7	14,1	2,5	3,7	340	260	150
26	ЕЛ16×32								3,0	4,4	86	74	53	13,3	12,3	12,6	2,3	3,4	420	327	250
27	37								2,9	4,2	96	83	60	13,1	12,2	12,5	2,3	3,3	470	370	280
28	42	0,28	0,24	0,12	1,1	0,9	1	17	2,8	4,1	108	93	67	13	12,1	12,4	2,2	3,3	530	410	310
29	49								2,8	4,0	121	104	75	12,9	12	12,3	2,1	3,2	590	460	350
30	56								2,7	3,9	136	117	84	12,8	11,8	12,2	2,1	3,1	660	520	390

№ сердечника	Обозначение сердечника	Данные для электрического расчета																			
		$к_{ок}$			$10^3 \alpha_к$, *вт/см²·°С*			50 *гц*, $к_с = 0,92$						400 *гц*, $к_с = 0,9$							
								B, тыс. *гс*	*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*			*B*, тыс. *гс*			*j*, *а/мм²*		$P_т$, *ва*		
		1	2	3	1	2	3	1—3	1 и 2	3	1	2	3	1	2	3	1 и 2	3	1	2	3
31	ЕЛ20×40								2,5	3,4	205	172	135	11,3	10,5	10,7	1,8	2,5	775	605	485
32	47								2,5	3,3	230	195	153	11,2	10,4	10,6	1,8	2,4	875	685	550
33	54	0,31	0,26	0,15	1	0,85	0,9	17	2,4	3,2	260	220	173	11,1	10,3	10,5	1,8	2,4	990	775	615
34	62								2,3	3,2	295	250	195	11,0	10,2	10,5	1,7	2,3	1120	880	690
35	70								2,3	3,1	335	292	220	10,9	10,1	10,4	1,7	2,3	1270	1000	790
36	ЕЛ25×50								2	2,6	430	365	300	9,6	8,9	9,1	1,5	2	1430	1110	950
37	58								2	2,5	490	410	340	9,5	8,8	9,0	1,5	1,9	1600	1250	1070
38	66	0,33	0,28	0,18	0,9	0,75	0,8	17	1,9	2,5	550	470	385	9,5	8,8	8,9	1,5	1,9	1800	1400	1200
39	77								1,8	2,4	620	525	435	9,4	8,7	8,9	1,4	1,8	2000	1570	1350
40	88								1,8	2,3	700	600	490	9,3	8,6	8,8	1,4	1,8	2260	1750	1500
41	ЕЛ32×64								1,8	2,2	860	740	640	9,1	8,4	8,6	1,4	1,7	2800	2180	2000
42	74								1,8	2,1	950	820	710	9	8,3	8,5	1,4	1,6	3060	2400	2200
43	84	0,35	0,3	0,22	0,9	0,75	0,8	17	1,7	2,0	1050	910	790	8,9	8,3	8,5	1,3	1,5	3300	2600	2400
44	97								1,6	2,0	1160	1010	880	8,9	8,2	8,4	1,3	1,5	3600	2800	2600
45	110								1,6	1,9	1300	1120	980	8,8	8,1	8,3	1,2	1,4	3960	3100	2800

Примечание. См. прим. к табл. 46.

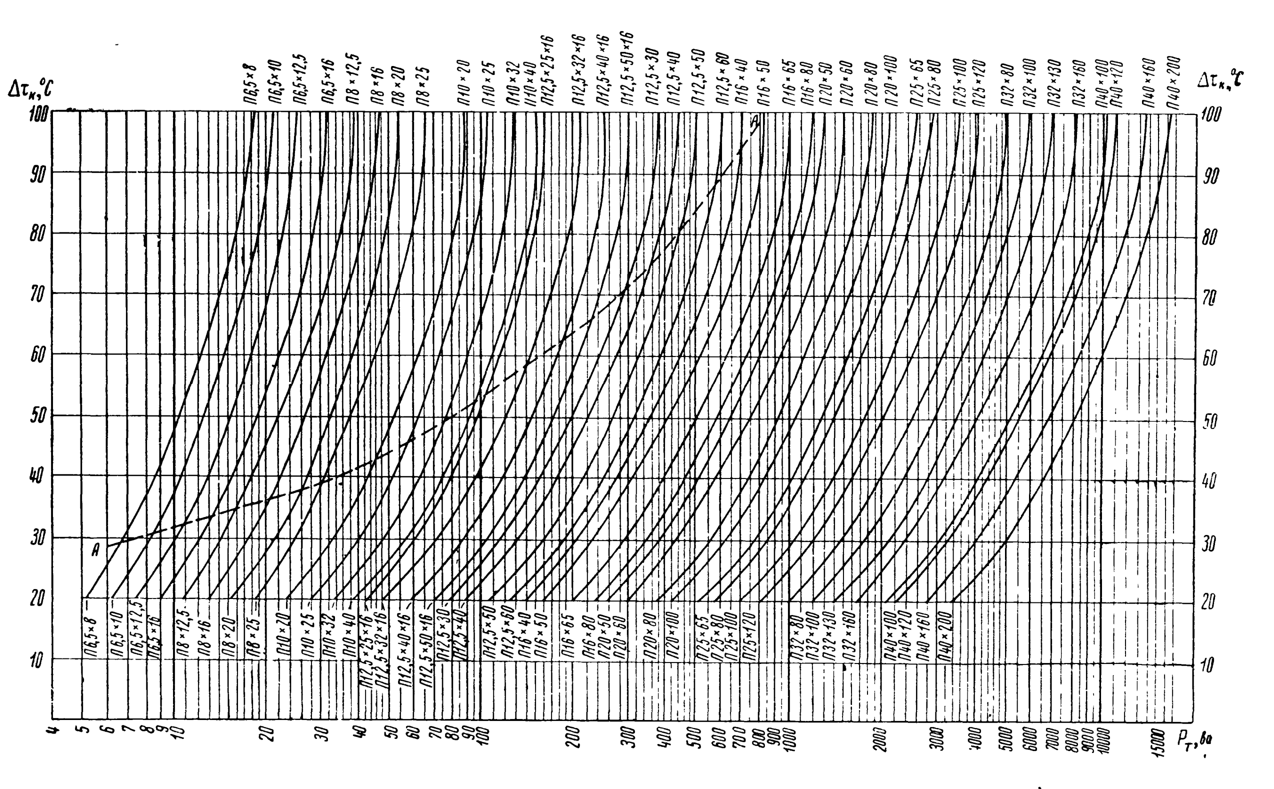


Рис. 117. К выбору типоразмера ленточного разъемного сердечника для стержневого трансформатора в зависимости от мощности и допустимого перегрева при частоте 400 *гц*. Мощности $P_т$ даны при полном заполнении окна катушкой.

ленточных сердечников по табл. 39 и «нормальных» условий приведены на рис. 117 (частота 400 *гц*). Аналогичные кривые могут быть рассчитаны и для других рядов сердечников. Кривая *АА* на рис. 117 соответствует граничным мощностям P_B (см. § 15).

Выбор сердечника с учетом оптимальных коэффициентов заполнения $к_{ок}$ и $к_с$. Как было пояснено в § 21, во многих случаях выгодно выбирать типоразмер сердечника, габаритная мощность которого существенно превышает габаритную мощность трансформатора, используя при этом неполное заполнение окна медью. Для выбора оптимального сердечника необходимо для всех типоразмеров рассчитать величину $\frac{V_с}{V_к} = \frac{\varphi_с}{\varphi_к}$ и в зависимости от условий расчета определить для них по рис. 86 и 87 оптимальные величины $к_{ок_{опт}}$. Для этих новых значений рассчитываются новые значения j и, соответственно, новые (уменьшенные) значения габаритных мощностей типоразмеров. Затем те или иные типоразмеры ряда могут быть исключены с оставлением лишь оптимальных по стоимости или сочетанию стоимости и веса (см. § 21).

Практически в большинстве случаев величину $к_{ок_{опт}}$ можно принимать в 1,5—2 раза меньшей, чем величину $к_{ок}$ при полном заполнении окна катушкой.

Аналогично следует поступить в отношении величины $к_с$ для трансформаторов повышенной частоты. Но здесь пересчитывается не величина j, а индукция B.

§ 28. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Электрический расчет производится после определения размеров сердечника. Из электрических величин известны P_{II} по (180), напряжение первичной обмотки U_1, напряжения и токи вторичных обмоток U_i и I_i. По ходу электрического расчета приходится вновь прибегать к ряду коэффициентов, устанавливаемых опытным путем,— $к_{ок}$, $к_с$ и $\alpha_к$. Если расчет ориентируется на стандартный ряд сердечников, эти коэффициенты уже установлены предшествующим опытом для каждого типоразмера и принятых условий проектирования трансформаторов. Если для расчета берется произвольно выбранный сердечник, можно пользоваться указаниями в § 26 и кривыми зависимости этих коэффициентов от мощности и частоты по рис. 114 и 115 с учетом замечаний в табл. 32. Если используется метод неполного заполнения окна сердечника катушкой, оптимальные значения $к_{ок}$ и $к_с$ выбираются по указаниям в § 19, 20, рис. 86, 87 и 88.

Расчет при полном заполнении окна катушкой. Отдельные пункты расчета могут быть различны для разных исходных условий расчета; эти пункты приводятся дифференцированно.

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
		Рис. 118
1	Испытательные напряжения $U_{исп}$, *в*	По рис. 118, где $U_p = U_i + \frac{1}{\sqrt{2}} U_=$, $U_=$ — постоянный потенциал, под которым находится данная i-тая обмотка
2	Материал и конструкция сердечника	По указаниям в § 26, гл II, III, IV, V (см § 4, 5, 8, 9, 19, табл. 2—4)
3	Материал обмоток	Медь или алюминий по заданию или указаниям в § 19, 12; удельное сопротивление ρ_{20° по § 7

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
4	Коэффициенты $к_с$, $к_{ок}$, $\alpha_к$ (*вт/см²·°С*)	Задаются или берутся по указаниям в § 26, 8, 11, 16, табл. 13, 15, рис. 114, 115, табл 32, 43—49
5	Геометрические параметры сердечника	Сечение $s_с$, *см²*; длина средней магнитной линии $l_с$, *см*; поверхности охлаждения катушки и сердечника $П_к$, $П_с$, *см²*; $\beta = \frac{П_с}{П_к}$; объем, занятый катушками, $V_к$, *см³*; вес сердечника $G_с$, *г*—по результатам расчета (см. § 27) и формулам табл. 26 (все эти величины берутся на одну фазу)
6	Качество сердечника	Индукция B_0 (*гс*) по (86) и рис 80; удельные потери p_{10} (*вт/кг*)—по (5), табл. 2, 3, 4, 16, 17, рис 44, 47

	Величина	Условия расчета		
		На заданный перегрев $\Delta\tau_к$		На заданное падение напряжения Δu (при перегреве, не превышающем заданного $\Delta\tau_к$)
		частота 50 *гц* (и высокие перегревы)	повышенные частоты	
7	Индукция *B*, *гс*	$B = 1{,}05 - 1{,}2\ B_0$—по (148)	См. ниже, п. 11	$B = 1{,}05 - 1{,}2\ B_0$ или см ниже, п. 11
8	Соотношение потерь (предварительно)	По (156 — 157)	Задается или по (106) $\nu' = \nu_0$	—

Продолжение

№ п/п	Величина	Условия расчета		
		На заданный перегрев $\Delta\tau_к$		На заданное падение напряжения Δu (при перегреве, не превышающем заданного $\Delta\tau_к$)
		частота 50 *гц* (и высокие перегревы)	повышенные частоты	
9	Допустимые потери в катушках $p'_к$, *вт* (на фазу)	По (46) $p'_к = \alpha_к \Delta\tau_к \Pi_к \frac{1+\beta\sqrt{\nu'}}{1+\nu'}$		$p'_к = \Delta u P_{II} \frac{1}{m} \frac{1}{1-\Delta u}$, P_{II} — по (180)
10	Потери в сердечнике p_c, *вт* (на фазу)	По (2) и (67) $p_c = p_{10}\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 G_c 10^{-3}$	$p_c = \nu' p'_к$	Из (44) $p_c = \left[\frac{\alpha_к \Delta\tau_к \beta \Pi_к}{2\sqrt{p'_к}} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_к \Delta\tau_к \beta \Pi_к}{2\sqrt{p'_к}}\right)^2 - p'_к}\right]^2$
11	Индукция *B*, *гс*	См п. 7	По (2) и (66) $B = 10\,000\sqrt{\frac{p_c}{p_{10}} \frac{10^3}{G_c}}$, но не выше 1,2 B_0	
12	Удельное сопротивление ρ («горячее»), *ом·мм²/м*	Берется при 75°: $\rho = 1{,}22 \times \rho_{20°}$, $\rho_{20°}$ — по п. 3		Берется либо при 75°, либо при другой температуре (задаваемой)

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
13	Плотность тока j', $а/мм^2$ (предварительно)	По (17) $j = \sqrt{\dfrac{p_к'}{\rho к_{ок} V_к}}$
14	Число витков на 1 *в* электродвижущей силы $\left(\dfrac{w}{E}\right)$, виток/*в*	$\dfrac{w}{E} = \dfrac{10^8}{4,44 f к_c s_c B}$
15	Падение напряжения (предварительно)	$\Delta u' = \dfrac{p_к'}{\dfrac{1}{m} P_{II} + p_к'}$, P_{II} по (180) (справедливо при активной нагрузке трансформатора)
16	Коэффициенты падения напряжения в первичной обмотке $к_I$ и вторичных обмотках $к_{II}$	$к_I = 1 - \dfrac{\Delta u'}{2}$; $к_{II} = 1 + \dfrac{\Delta u'}{2}$. Для накальных обмоток $к_{II}$ целесообразно увеличить на величину 0,03
17	Число витков обмоток (предварительно)	Первичной $w_1' = к_I U_1 \left(\dfrac{w}{E}\right)$, вторичных $w_i' = к_{II} U_i \left(\dfrac{w}{E}\right)$

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
18	Полный намагничивающий ток в рабочем режиме	По (85): активная составляющая $$I_{0a} = \frac{p_c}{\kappa_1 U_1};$$ намагничивающая составляющая (предварительно) $$I'_{0\mu} = \frac{P_{0\mu}}{E} = \frac{1}{w'_1}\left(H_{\sim} l_c + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1{,}6B\delta\right).$$ Здесь δ — односторонний зазор, *см*. Для замкнутых ленточных сердечников $\delta = 0$, для разъемных ленточных сердечников по § 11 $\delta = 5 - 25$ *мк*, т е. $(0{,}5 - 2{,}5) \cdot 10^{-3}$ *см*, обычно — около 15 *мк*. Для шихтованных сердечников из пластин $\delta = 20 - 40$ *мк* $= (2 - 4) \cdot 10^{-3}$ *см*. Напряженность $H_{\sim}$ определяется в зависимости от индукции B и сорта материала по кривым рис. 43, 45, табл. 2—4 (см. гл. III). Для трехфазных трансформаторов l_c берется для крайней фазы
19	Ток первичной обмотки (предварительно)	$$I'_1 = \sqrt{\left(\sum_{i=2}^{N} \frac{w'_i}{w'_1} \kappa_{Bi} I_i + I_{0a}\right)^2 + I^2_{0\mu}}.$$ Здесь κ_{Bi} — по (68) и табл 22 (см. § 17, а также § 26)

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
20	Относительный намагничивающий ток i_0' (предварительно)	$$i_0' = \frac{P_{0\mu}}{P_{II}} = \frac{mEI_{0\mu}'}{P_{II}} = \frac{m\kappa_1 U_1 I_{0\mu}'}{P_{II}}$$ Если i_0' более заданного, необходимо уменьшить индукцию B и повторить расчет заново. При заметном снижении индукции следует перейти на больший типоразмер сердечника.
21	Изоляция катушек и обмоточные провода	Выбираются в зависимости от заданных условий в соответствии с данными, приведенными в §6 и 7 Сечения проводов: $q_i' = \frac{I_i}{j'}$ По стандартам (см. табл. 11, § 7) выбирается провод ближайшего сечения q_i, определяется его диаметр (стороны сечения) и толщина изоляции (см. табл. 12, § 7)
22	Размещение обмоток в окне	Производится с учетом указаний и особенностей, приведенных в § 4, 17. При размещении проводов следует учитывать коэффициенты укладки и выпучивания по табл. 19 (см. § 12). Ниже даем таблицу для выбора в зависимости от напряжения числа слоев изоляции при использовании наиболее распространенных ее видов для низковольтных трансформаторов с обычными рабочими температурами. Там же даны рекомендуемые величины зазоров (буртиков — см. рис. 10) между границей обмотки и сердечником для бескаркасных катушек

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина		Путь определения				
Число слоев изоляции							
Назначение изоляции			Корпусная и межобмоточная				Толщина, *мм* (буртик)
Вид изоляции			Бумага с пропиткой лаками 447 или 321-Т				
Диаметры проводов, ***мм***			<0,4	0,4—1	1—1,5	>1,5	Все
Марка бумаги			КТН	К-08	К-12	К-17	К
$U_{исп}$, *в* (по п. 1)		600	1	1	1	1	2
		700	1	1	1	1	
		1000	2	2	2	2	
		1400	3	3	3	2	
		1700	3	3	3	3	
		2200	4	4	4	3	3
		2700	5	5	4	4	4
		3600	6	6	5	4	6

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
22	Размещение обмоток в окне	При невозможности разместить обмотки необходимо перейти к ближайшему большему типоразмеру сердечника, при чрезмерной свободе в окне (свободно более 15—25% площади окна) — к ближайшему меньшему типоразмеру (если это не приводит к увеличению стоимости или веса трансформатора), после чего повторить расчет заново.
23	Сопротивления всех обмоток в горячем состоянии r_i	Подсчитываются в соответствии с п. 12
24	Окончательные значения параметров	Число витков первичной обмотки $w_1 = \frac{U_1 - I_1' r_1}{к_I U_1} w_1'$; число витков вторичных обмоток $w_i = \frac{U_i}{\frac{w_i'}{w_1}(U_1 - I_1' r_1) + I_i r_i} w_i'$; намагничивающая составляющая полного намагничивающего тока $I_{0\mu} = I_{0\mu}' \frac{w_1'}{w_1}$; первичный ток $I_1 = \sqrt{\left(\sum_{i=2}^{N} \frac{w_i}{w_1} к_{вi} I_i + I_{0a}\right)^2 + I_{0\mu}^2}$;

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
24	Окончательные значения параметров	потери в катушках $p_{к} = \sum_{i=1}^{N} I_i^2 r_i;$ плотности тока в обмотках $j_i = \frac{I_i}{q_i};$ соотношение потерь $\nu = \frac{p_{с}}{p_{к}};$ относительный намагничивающий ток $i_0 = m \frac{(U_1 - Ir_1) I_{0\mu}}{P_{II}};$ относительное падение напряжения $\Delta u = \frac{p_{к}}{\frac{P_{II}}{m} + p_{к}}$ [при активной нагрузке; в иных случаях — по (28), § 11]

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
25	Перегрев катушек	$$\Delta\tau_к = \frac{p_к + p_с}{\alpha_к \Pi_к (1 + \beta\sqrt{v})}.$$ Если $\Delta\tau_к$ превышает заданную величину, надо взять ближайший больший типоразмер сердечника и повторить расчет заново. Если $\Delta\tau_к$ меньше заданной величины на 15 — 25% или более, необходимо взять меньший типоразмер и повторить расчет заново
26	К. п. д	$$\eta = 1 - \frac{m(p_к + p_с)}{P_{II} + m(p_к + p_с)}$$
27	Ток холостого хода I_0	Контролируется при испытании трансформатора Индукция в режиме холостого хода $$B_{xx} = B\frac{U_1}{U_1 - I_1 r_1}.$$ Ток холостого хода $$I_0 = \sqrt{I^2_{0\mu_{xx}} + I^2_{0a}},$$ где $I_{0\mu_{xx}}$ рассчитывается по п. 18 при величине $H_{\sim}$, соответствующей индукции B_{xx} Для не очень маленьких трансформаторов повышенной частоты $I_{0\mu_{xx}} \approx I_{0\mu}$ (исключая высокие перегревы)

Продолжение

№ п/п	Определяемая величина	Путь определения
28	Индуктивность рассеяния	Если необходимо вычисление индуктивности рассеяния, это можно сделать через величину $u_{кx}$. При концентрических обмотках $u_{кx}$ берется по (21) Для рассеяния между обмотками тороидального трансформатора на основании закона полного тока можно получить выражение, аналогичное (21), только здесь $m' = 1$; $l_s = \pi D_{ср}$, где $D_{ср}$ — средний диаметр сердечника При чередующихся обмотках в (21) $$\Delta' = \frac{1}{(к_r - 1)^2}\left[\Delta + (к_r - 1)\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3}\right],$$ где $к_r$ — число чередующихся секций обмоток в катушке, Δ_1, Δ_2 — высота секций

Значения j и B, рассчитанные в соответствии с п. 7, 13 и 11, занесены для «нормальных» условий в таблицы стандартных рядов сердечников (табл. 43—49). При этом значения B даны для условий достаточно качественной технологии изготовления сердечников.

При необходимости пересчитать значения B и j на другие условия, отличные от «нормальных», можно воспользоваться формулами: для расчета на перегрев при повышенных частотах — (133) и (134), то же при нормальной частоте — (149) и (147) — (148).

Пересчетные коэффициенты, на которые следует умножать j и B при переходе к другим перегревам, частотам, сердечникам другого качества, приведены в табл. 50 для различных случаев расчета.

Таблица 50

Ориентировочные коэффициенты пересчета индукции и плотности тока к табл. 43—49

Фактор пересчета	Коэффициенты пересчета: плотности тока. Условия расчета: повышенные частоты	Коэффициенты пересчета: плотности тока. Условия расчета: нормальная частота	Коэффициенты пересчета: индукции. Условия расчета: повышенные частоты	Коэффициенты пересчета: индукции. Условия расчета: нормальная частота
На другой перегрев $\Delta\tau_к$	$\sqrt{\frac{\Delta\tau_к}{50}}$	$\sim\sqrt{\frac{\Delta\tau_к}{50}}$	$\sqrt{\frac{\Delta\tau_к}{50}}$	1
На другую частоту	1	1	$\sqrt[4]{\left(\frac{400}{f}\right)^3}$	1
На другую группу качества сердечников	1	—	1,07 или 0,93	—

Пример расчета.

Задано: частота 400 *гц*; $\Delta\tau_к = 50°$; токи и напряжения обмоток: $U_1 = 115$ *в*, $U_2 = 290$ *в* (со средней точкой), $I_2 = 1{,}2$ *а*, $U_3 = U_4 = 6{,}3$ *в*, $I_3 = 2{,}5$ *а*, $I_4 = 1{,}25$ *а*, тип трансформатора — стержневой на разъемном ленточном сердечнике по нормали НО. 666. 002. (см. табл. 39). Все условия — «нормальные».

Находим

$$P_{II} = 290 \cdot 1{,}2 + 6{,}3 \cdot 2{,}5 + 6{,}3 \cdot 1{,}25 = 372 \text{ ва}.$$

Выберем типоразмер сердечника. По рис. 112 $\eta = 0{,}955$ и по (182)

$$P_г = \frac{1}{2}\left[372 + \frac{1}{0{,}955}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot 290\cdot 1{,}2 + 6{,}3\cdot 2{,}5 + 6{,}3\cdot 1{,}25\right)\right] = 323 \text{ ва}.$$

По табл. 47 или рис. 117 находим типоразмер ПЛ16 $\times$ 40 (то же можно сделать по § 27).

Далее по пунктам расчета:

1. $U_{исп1} = 400$ *в*, $U_{исп2} = 1200$ *в*, $U_{исп3} = U_{исп4} = 350$ *в*, $U_{исп1-2} = U_{исп2-3} = U_{исп2-4} = 1200$ *в*

2. Задано.

3. Медь, $\rho_{20°} = 0{,}017$ *ом·мм²/м*.

4. По табл. 47 $\kappa_c = 0{,}9$; $\kappa_{ок} = 0{,}28$; $\alpha_к = 1{,}1\cdot 10^{-3}$ *вт/см²·°С*.

5. По табл. 39 $s_c = 5{,}12$ *см²*; $l_c = 18$ *см*, $G_c = 636$ *г*, по табл. 26 и (127) для $x = 1{,}6$; $y = 2$; $z = 2{,}5$; $П_к = 166$ *см²*, $П_c = 80$ *см²*, $\beta = 0{,}48$, $V_к = 135{,}6$ *см³*.

6. По табл. 17 $p_{10} = 11$ *вт/кг*.

7. См. п. 11.

8. $\nu' = (1 + 0{,}48)^2 = 2{,}2$.

9. $p_к' = 1{,}1\cdot 10^{-3}\cdot 50\cdot 166\,\dfrac{1 + 0{,}48\sqrt{2{,}2}}{1 + 2{,}2} = 4{,}9$ *вт*.

10. $p_c = 2{,}2\cdot 4{,}9 = 10{,}8$ *вт*.

11. $B = 10\,000\sqrt{\dfrac{10{,}8}{11}\cdot\dfrac{10^3}{636}} = 12\,400$ *гс*

12. $\rho = 1{,}22\cdot 0{,}017 = 0{,}021$ *ом·мм²/м*.

13. $j' = \sqrt{\dfrac{4{,}9}{0{,}021\cdot 0{,}28\cdot 135{,}6}} = 2{,}5$ *а/мм²*.

14. $\dfrac{w}{E} = \dfrac{10^8}{4{,}44\cdot 400\cdot 0{,}9\cdot 5{,}12\cdot 12\,400} = 0{,}99$ виток/*в*.

15. $\Delta u' = \dfrac{4{,}9}{372} = 0{,}0132$.

16. $\kappa_1 = 1 - \dfrac{0{,}0135}{2} = 0{,}993$, $\kappa_2 = 1 + \dfrac{0{,}0135}{2} = 1{,}007$. Для третьей и четвертой (накальных) обмоток $\kappa_3 = \kappa_4 = 1{,}007 + 0{,}03 = 1{,}037$.

17. $w_1' = 0{,}993\cdot 115\cdot 0{,}99 = 116$; $w_2 = 1{,}007\cdot 290\cdot 0{,}99 = 290$; $w_3' = w_4' = 1{,}037\cdot 6{,}3\cdot 0{,}99 = 6{,}5 \approx 7$.

18. $I_{0a} = \dfrac{10{,}8}{0{,}993\cdot 115} = 0{,}1$ *а*; $I_{0\mu} = \dfrac{1}{116}\left(1{,}2\cdot 18 + \dfrac{1}{\sqrt{2}}\,1{,}6\cdot 12\,400\cdot 1{,}5\times 10^{-3}\right) = 0{,}3$ *а*.

19. $I_1' = \sqrt{\left(\frac{290\cdot 1}{116\cdot\sqrt{2}}\cdot 1{,}2+\frac{7}{116}\cdot 2{,}5+\frac{7}{116}\cdot 1{,}25+0{,}1\right)^2+0{,}3^2} =$

$= 2{,}46$ *а*.

20. $i_0' = \frac{0{,}993\cdot 115\cdot 0{,}3}{372} = 0{,}09.$

21. Первичная обмотка выполняется двумя параллельными ветвями с токами $\frac{1}{2}\cdot 2{,}46$ *а*,

$$q_1' = \frac{\frac{1}{2}2{,}46}{2{,}5} = 0{,}49\ мм^2;\quad q_2' = \frac{1{,}2}{2{,}5} = 0{,}48\ мм^2;$$

$$q_3' = \frac{2{,}5}{2{,}5} = 1\ мм^2;\quad q_4 = \frac{1{,}25}{2{,}5} = 0{,}48\ мм^2.$$

По стандартам — провод ПЭВ-2; $q_1 = 0{,}5$; $q_2 = 0{,}5$; $q_3 = 1{,}06$; $q_4 = 0{,}05$, диаметры (*мм*): 0,8; 0,8; 1,16; 0,8; толщина изоляции $\Delta_{из}$ (*мм*): 0,09; 0,09; 0,11; 0,09. Обмотки размещаются в прессованных каркасах из пресс-порошка К-21-22. Слоевая и межобмоточная изоляция — кабельная бумага К-08. Пропитка лаком 321-Т.

22. Обмотки разбиваем на две катушки. Части второй (анодной) обмотки, располагаемые на разных стержнях, соединяются последовательно. Учитывая также сказанное в п. 21, получим: в левой катушке — 116 витков первичной обмотки, 135 витков второй обмотки и вся третья обмотка, в правой катушке — 116 витков первичной обмотки, 135 витков второй обмотки и вся четвертая (мощности двух катушек при этом примерно одинаковы). Размеры каждого каркаса в свету: высота 36 *мм*, ширина 10,3 *мм*. Периметр гильзы каркаса — 118,4 *мм*. Конструктивная (расчетная) ширина провода — $к_{укл}(\varnothing + \Delta_{из})$, высота провода — $к_{вып}(\varnothing + \Delta_{из})$. Для наших диаметров $к_{укл} \approx к_{вып} \approx 1{,}1$. Это дает число витков в слое для обмоток соответственно 37; 37; > 7; > 7 и число слоев в каждой катушке 4; 4 и 1. В качестве межобмоточной изоляции прокладывается по три слоя бумаги, межслоевой — по одному слою (межслоевая изоляция прокладывается из конструктивных соображений). В итоге толщина катушек оказывается 10,2 *мм*. Обмотки в каркасах размещаются.

23. Средние длины витков обмоток: в левой катушке — 13,19 *см*; 16,1 *см*; 18 *см*; в правой катушке — 13,19 *см*, 16,1 *см*, 17,9 *см*. Сопротивления обмоток при 75° — $\frac{1}{2}\cdot 0{,}66 = 0{,}33$ *ом*; 1,99 *ом*; 0,025 *ом*, 0,054 *ом*. Увеличиваем сопротивление накальных обмоток до $1{,}03\cdot 0{,}025 = 0{,}026$ *ом*, $1{,}03\cdot 0{,}054 = 0{,}056$ *ом*.

24. $w_1 = \frac{115 - 2{,}46\cdot 0{,}33}{115\cdot 0{,}993}\cdot 116 = 116;$

$$w_2 = \frac{290}{\frac{290}{116}(115 - 2{,}46\cdot 0{,}33) + 1{,}2\cdot 1{,}99}\cdot 290 = 291;$$

$$w_3 = \frac{6{,}5}{\frac{7}{116}(115 - 2{,}46\cdot 0{,}33) + 2{,}5\cdot 0{,}026}\cdot 7 = 7;$$

аналогично $w_4 = 7$.

$$I_{0\mu} = I'_{0\mu}; \quad I_1 = I'_1;$$

$$p_к = 2{,}46^2 \cdot 0{,}33 + 1{,}2^2 \cdot 1{,}99 + 2{,}5^2 \cdot 0{,}026 + 1{,}25^2 \cdot 0{,}056 = 5 \text{ вт};$$

$$j_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot 2{,}46}{0{,}5} = 2{,}46 \text{ а/мм}^2; \qquad j_2 = \frac{1{,}2}{0{,}5} = 2{,}4 \text{ а/мм}^2;$$

$$j_3 = \frac{2{,}5}{1{,}06} = 2{,}4 \text{ а/мм}^2; \qquad j_4 = \frac{1{,}25}{0{,}5} = 2{,}5 \text{ а/мм}^2;$$

$$\nu = \frac{10{,}8}{5} = 2{,}2; \qquad i_0 = i'_0; \qquad \Delta u = \frac{5}{372} = 0{,}014.$$

25. $\Delta\tau_к = \dfrac{5 + 10{,}8}{1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 166 \left(1 + 0{,}48 \sqrt{2{,}2}\right)} = 50°$, т. е. перегрев не превышает заданного.

26. $\eta = 1 - \dfrac{5 + 10{,}8}{372 + 5 + 10{,}8} = 0{,}959$

27. $B_{хх} = 12\,400 \dfrac{115}{115 - 2{,}46 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0{,}66} = 12\,500$ гс,

$$I_{0\mu хх} \approx I_{0\mu}; \qquad I_0 = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}1^2} = 0{,}32 \text{ а}$$

Расчет закончен.

Расчет при неполном заполнении окна катушкой (при уменьшенных значениях $к_{ок}$). Принципиально расчет ведется так же и по той же схеме, что и выше — для случая полного заполнения окна. В первом приближении можно пользоваться и точно теми же формулами, но с введением нового значения $к_{ок опт}$. Лишь при предварительном расчете допустимых потерь в катушках $p'_к$ (п. 9) и плотности тока j' (п. 13), а также расчете перегрева $\Delta\tau_к$ (п. 25) возможны некоторые неточности из-за изменения реальных величин поверхности охлаждения $П_к$ и объема катушки $V_к$ по сравнению с полученными по табл. 26 из условия полного использования окна катушкой с коэффициентом $к_{ок}$ (при неполном заполнении окна толщина катушки $\Delta_к$ становится меньше, чем ширина окна для БТ или ее половина для СТ — см. рис. 108).

Расчет новых значений $П_к$ и $V_к$ можно производить по следующим ориентировочным формулам:

для БТ:

$$\Delta_к = c\sqrt{\frac{к_{ок\,опт}}{к_{ок}}};$$

$$П_к = 2h(a + \xi b + \pi\Delta_к) + 2\Delta_к(2a + \pi\Delta_к);$$

$$V_к = \Delta_к h\,[2(a + b) + \pi\Delta_к];$$

для СТ:

$$\Delta_к = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{к_{ок\,опт}}{к_{ок}}};$$

$$П_к = 2\left\{2h\left[a + \frac{1}{2}b(1 + \xi) + \pi\Delta_к\right] + 2\Delta_к(2a + b + \pi\Delta_к)\right\};$$

$$V_к = 2\Delta_к h\,[2(a + b) + \pi\Delta_к].$$

Коэффициент ξ лежит в пределах 0,6—1. Размеры a, b, c, h — по рис. 90. В остальном расчет проводится по-прежнему.

В предыдущем примере расчета рационально вместо типоразмера П16 × 40 взять следующий больший типоразмер П16 × 50 с уменьшением сечений всех проводов в 1,4 раза (диаметров — примерно в 1,2 раза). При этом вес практически сохраняется, габаритный объем — также, а расход меди сокращается в 1,5 раза. Снижается стоимость материалов. Перегрев сохраняется практически тот же.

* * *

В заключение отметим, что одни из первых работ по расчету т. м. м. повышенной частоты были проведены в СССР канд. техн. наук А. В. Захаровым и канд. техн. наук Н. М. Тищенко.

В настоящее время проводятся опыты по использованию для расчетов т. м. м. электронных вычислительных машин. Это сокращает процесс расчета до нескольких минут.

§ 29. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Принципиальной разницы между расчетом трансформатора и автотрансформатора нет.

Как известно, габаритной мощностью автотрансформатора $P_г$ является так называемая проходная мощность, т. е. та часть мощности, которая передается из первичной цепи во вторичную

электромагнитным путем (другая часть передается чисто электрически). При этом проходная мощность равна $P_{II}(1-\kappa_т')$, где коэффициент трансформации $\kappa_т'$ берется как отношение меньшего числа витков к большему.

С учетом потерь в автотрансформаторе вместо (182) здесь будем иметь

$$P_г = P_{II}(1-\kappa_т')\left(1+\frac{\kappa_в}{\eta}\right). \tag{199}$$

Чем ближе $\kappa_т'$ к единице, тем меньше габаритная мощность автотрансформатора при данной вторичной мощности и тем целесообразнее его применение. При одинаковой мощности автотрансформатор по сравнению с трансформатором будет иметь выигрыш в весах и габаритах в соответствии с выражениями (81), (94) и (101):

$$\left.\begin{aligned} &\text{на повышенной частоте — в } \frac{1}{1-\kappa_т'} \text{ раз;}\\ &\text{при нормальной частоте — в } \sqrt[7]{\left(\frac{1}{1-\kappa_т'}\right)^6} \text{ раз;}\\ &\text{при заданном } \Delta u \text{ — в } \sqrt[5]{\left(\frac{1}{1-\kappa_т'}\right)^3} \text{ раз.} \end{aligned}\right\} \tag{200}$$

Наибольший эффект достигается, как видно из (200), на повышенной частоте, наименьший — при постоянном Δu.

Уменьшение веса и объема автотрансформатора по сравнению с трансформатором характеризуется для различных случаев цифрами, приведенными в табл. 51.

Таблица 51

Уменьшение веса и объема автотрансформатора по сравнению с трансформатором

	$\kappa_т'$		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,1
Выигрыш в число раз	$\Delta\tau_к = \mathrm{const}$	Повышенные частоты	10	5	3,3	2,5	2	1,4	1,10
		Нормальная частота	7	4	2,8	2,2	1,8	1,3	1,08
	$\Delta u = \mathrm{const}$		4	2.6	2	1,7	1,5	1,2	1,06

Автотрансформаторы малой мощности можно рассчитывать в полном соответствии с изложенным в § 26—28, но в основу расчета нужно брать мощность $P_г$ по (199). Кроме того, ввиду отсутствия межобмоточной изоляции коэффициент $к_{ок}$ при прочих равных условиях может быть увеличен в 1,1—1,2 раза.

При электрическом расчете следует отдельно вычислить токи в различных частях обмотки автотрансформатора: в той части, где протекает ток только одной цепи $I_{од}$, и в той части, где совместно протекают токи первичный и вторичный, давая результирующий ток $I_{общ}$ (рис. 119). По этим токам и следует затем рассчитать сечения обеих частей обмотки и выбрать провода. По ним и сопротивлениям частей обмотки рассчитывают окончательно и потери в катушках.

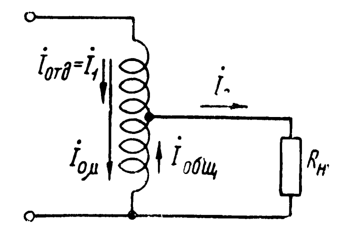


Рис. 119. К определению токов в частях обмотки автотрансформатора

При работе на активную нагрузку

$$I_{общ}=\sqrt{(I_2-I_1)^2+I_{0\mu}^2},$$

где I_2 — бо́льший из двух токов.

Из-за меньших потерь в катушках к. п. д. у автотрансформатора несколько выше, чем у трансформатора той же мощности, и падение напряжения соответственно меньше. Вследствие уменьшения размеров коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ при $к_т'$, близких к единице, при той же мощности оказывается несколько бо́льшим.

Во всем остальном расчет полностью следует изложенному в § 28.

Иногда совмещают функции автотрансформатора и трансформатора, подключая к последнему одну из нагрузок автотрансформаторным способом. Для этого случая

$$I_{общ}=\sqrt{\left(I_{0a}+I'_{IIa}+I'_a-I_a\right)^2+\left(I_{0\mu}+I'_{IIr}+I'_r-I_r\right)^2},$$

$$I_{од}=\sqrt{\left(I_{0a}+I'_{IIa}+I'_a\right)^2+\left(I_{0\mu}+I'_{IIr}+I'_r\right)^2},$$

где I_{0a} — активная составляющая намагничивающего тока;

$I_{0\mu}$ — его реактивная составляющая;

I'_{IIa} — активная составляющая приведенного тока трансформаторных обмоток;

I'_{IIr} — его реактивная составляющая;

I_a — активная составляющая тока автотрансформаторной нагрузки;

I_r — его реактивная составляющая;

I'_a, I'_r — I_a, I_r, приведенные к первичной обмотке.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ СХЕМ ЗАРЯДА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Емкостные накопители широко применяются в импульсной технике. За время паузы между двумя формируемыми импульсами емкость накопителя C, заряжаясь, запасает энергию, которая в течение короткого, по сравнению с паузой, импульса отдается в нагрузку. Соответственно средняя мощность импульса оказывается во много раз больше средней мощности за время заряда. Случаи, когда время импульса исчисляется микросекундами, а время заряда (паузы) сравнимо с длительностью периода переменного напряжения питания $T_{\sim}$, достаточно полно рассмотрены в литературе по импульсной технике. Мы же рассмотрим случай, когда время заряда значительно (не менее чем в несколько раз) превышает величину $T_{\sim}$ и конденсатор заряжается от сети переменного тока через повышающий трансформатор ТП и выпрямитель В. Подобные режимы характерны для многих случаев. Заряд накопителя выпрямленным током может осуществляться по любой схеме выпрямления.

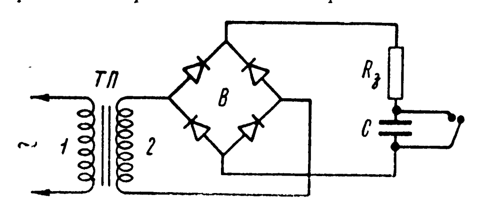


Рис 120. Схема заряда емкостного накопителя выпрямленным током.

Для определенности примем за базовую мостовую двухполупериодную схему, а затем полученные выводы распространим и на другие схемы.

Для ограничения величин токов в цепь заряда включается последовательно зарядное сопротивление $R_з$ (в цепи выпрямленного или переменного тока). Указанная схема заряда изображена на рис. 120. Схемы заряда через активно-индуктивное сопротивление в цепи выпрямленного тока и через индуктивность по методу так называемого линейного заряда не рассматриваются, поскольку они применяются только в трехфазных системах при больших мощностях, выходящих за рамки содержания данной книги.

Трансформаторы, питающие схемы заряда накопителей, работают в специфических режимах, что обусловливает особенности определения основных электрических параметров трансформаторов. Рассмотрению этих особенностей и определению необходимых зависимостей при заданных параметрах накопителя и посвящается настоящая глава. По ходу анализа устанавливаются также зависимости и соотношения, позволяющие опреде-

лить параметры не только трансформатора, но и всех других элементов схемы заряда, для которой трансформатор является органической, неотъемлемой составной частью.

§ 30. ПРОЦЕСС ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЯ

За время заряда напряжение на емкости u_0 непрерывно меняется от некоторого начального значения U_{01} до конечного $U_{0к}$, что при питании выпрямленным напряжением u приводит к непрерывному изменению углов отсечки тока θ и его амплитуд (рис. 121). Соответственно от полупериода к полупериоду изменяются средние и действующие значения тока заряда i. При напряжении $U_{0к}$ происходит быстрый (в течение импульса $t_и$)

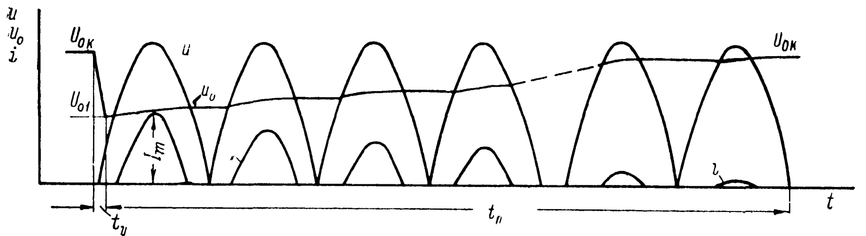


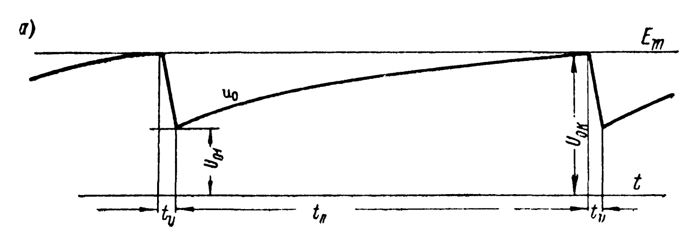
Рис. 121. Процесс заряда и разряда емкостного накопителя.

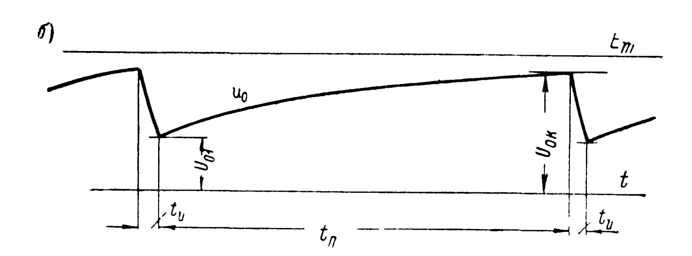
разряд накопителя до напряжения U_{01}. В ближайший последующий полупериод ток заряда достигает максимальной величины I_m.

Обозначим $\frac{U_{0к}}{U_{01}} = \alpha$. Обычно, в целях обеспечения допустимого спада импульса, $1 < \alpha \leqslant 2$. Однако при использовании для формирования импульса искусственной длинной линии осуществляется полный разряд накопителя до $U_{01} \approx 0$ $(\alpha = \infty)$. В этом случае ток I_m принимает максимально возможное для данной схемы значение I_{mm}. При $U_{01} > 0$ ток I_{mm} имеет место при первом, начальном включении схемы, поэтому будем его называть током начального включения. Для общности будем полагать далее $U_{01} \geqslant 0$, $1 < \alpha \leqslant \infty$. Принципиально возможны три различных режима заряда. В режиме *полного* заряда накопитель к концу паузы заряжается как раз до амплитудного значения э. д. с. трансформатора E_m, т. е. $U_{0к} = E_m$.

В режиме *неполного* заряда накопитель не успевает зарядиться до напряжения E_m и $U_{0к} < E_m$. Наконец, возможен и режим *ускоренного* заряда, когда напряжение накопителя достигает значения E_m ранее, чем заканчивается пауза между импульсами $t_п$. Указанные случаи иллюстрируются рис. 122. После разряда накопителя вновь возобновляется процесс заряда и т. д.

Нарастание напряжения u_0 во время заряда идет по сложной ступенчатой кривой. Действительно, рассмотрим два соседних полупериода напряжения питания, показанные на рис. 123. На этом рисунке e — кривая выпрямленных мгновенных э. д. с.





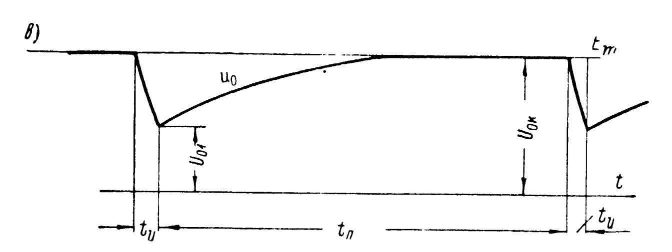


Рис. 122 Различные режимы заряда накопителя: *а* — режим полного заряда, *б* — режим неполного заряда; *в* — режим ускоренного заряда.

трансформатора, т. е. напряжений питающей сети, приведенных ко вторичной обмотке трансформатора. Индекс n соответствует номеру произвольно выбранного полупериода от начала заряда.

За время проводимости в течение n-го полупериода напряжение u_0 нарастает от начального значения u_{n-1} до конечного u_{0n}. Между периодами проводимости за время $2\theta_n$ заряда не происходит и напряжение на емкости не меняется. В следующий

$(n+1)$-й полупериод оно снова несколько возрастает до величины $u_{0_{n+1}}$ и т. д.

Чтобы упростить решение задачи, заменим реальную кривую u_0 некоторой плавной, соединяющей точки $u_{0_{n-1}}$ и $u_{0_{n+1}}$. Примем также, что углы отсечки внутри одного полупериода, например θ_{n-1} и θ_n, равны между собой и меняются только от полупериода к полупериоду. Эти допущения будут тем более справедливы, чем больше время паузы по сравнению со временем одного полупериода. Как правило, эти времена несравнимы. Действительно, даже при питании 50 *гц* и паузе порядка

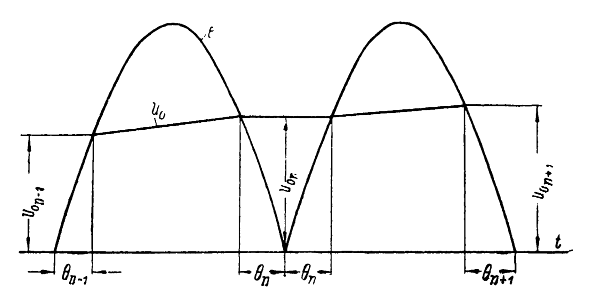


Рис. 123 Процесс заряда для двух соседних полупериодов питающего напряжения.

0,5 сек. эти времена отличаются в 50 раз. При таких условиях можно принять, что заряд емкости идет по экспоненциальному закону, что хорошо подтверждается опытом.

Задачей анализа является определение действующих значений необходимой вторичной э. д. с. трансформатора E и токов во вторичной I и первичной I_1 его обмотках при заданных конечном напряжении накопителя $U_{0к}$, глубине разряда $\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}}$, емкости накопителя C и времени паузы между импульсами $t_п$. Для полного расчета схемы необходимо также определить величину зарядного сопротивления $R_з$, действующий ток в нем $I_з$, максимальные токи заряда I_m и включения I_{mm} и параметры выпрямителя.

§ 31. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕСС ЗАРЯДА

Для анализа примем, кроме оговоренных, также допущения, что сопротивление выпрямителей В есть величина постоянная, равная некоторому среднему значению, а индуктивность рассеяния трансформатора ТП отсутствует. Правомерность этих допущений очевидна: сопротивление выпрямителей $r_в$ составляет, как правило, лишь часть полного сопротивления цепи заряда;

сопротивление рассеяния т. м. м., как указывалось в § 14, много меньше их активного сопротивления $r_к$. Во избежание излишних осложнений пренебрежем также током намагничивания трансформатора, не оказывающим практического влияния на изучаемое явление. Все величины, если не делается оговорок, полагаем приведенными ко вторичной обмотке трансформатора.

Все сопротивления цепи заряда объединим в суммарное сопротивление (см. рис. 120)

$$R=R_з+r_в+r_к.$$

Как обычно,

$$r_к=r_{т2}+r'_{т1},$$

где $r_{т2}$—сопротивление вторичной обмотки трансформатора;
$r_{т1}$—сопротивление первичной обмотки, приведенное ко вторичной.

Рассмотрим произвольный полупериод заряда (индекс n для обозначения произвольного полупериода здесь и в дальнейшем опускаем).

Для мгновенного тока имеем

$$i=\frac{e-u_0}{R}=\frac{E_m\sin t-u_0}{R}. \qquad (201)$$

Из рис. 123

$$u_0=E_m\sin\theta, \qquad (202)$$

и

$$i=\frac{E_m}{R}(\sin t-\sin\theta). \qquad (203)$$

Средний ток за полупериод

$$i_0=\frac{1}{\pi}\int\limits_{\theta}^{\pi-\theta} i\,dt=\frac{E_m}{R}\,\frac{2\cos\theta-\sin\theta(\pi-2\theta)}{\pi}. \qquad (204)$$

Действующий ток за полупериод

$$i_{eff}=\sqrt{\frac{1}{\pi}\int\limits_{\theta}^{\pi-\theta} i^2dt}=\frac{E_m}{R}\cdot\frac{\sqrt{1{,}5\sin 2\theta-(\pi-2\theta)(1-0{,}5\cos 2\theta)}}{\sqrt{\pi}}. \qquad (205)$$

Выражения (204) и (205) проинтегрированы с учетом (203). Теперь необходимо определить результирующие токи за всю паузу.

Средний ток

$$I_0=\frac{1}{t_п}\int\limits_0^{t_п} i_0\,dt, \qquad (206)$$

используя (204), выводим

$$I_0 = \frac{E_m}{R} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{t_п} \int\limits_0^{t_п} [2\cos\theta - \sin\theta(\pi - 2\theta)]\, dt. \qquad (207)$$

Действующий ток за время паузы

$$I = \sqrt{\frac{1}{t_п} \int\limits_0^{t_п} i_{eff}^2\, dt}\,, \qquad (208)$$

используя (205), получаем

$$I = \frac{E_m}{R} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{t_п} \int\limits_0^{t_п} [1{,}5\sin 2\theta - (\pi - 2\theta)(1 - 0{,}5\cos 2\theta)]\, dt}\,. \qquad (209)$$

Для интегрирования выражений (207) и (209) необходимо найти закон изменения угла отсечки θ во времени.

В соответствии с рис. 122 и принятыми допущениями, исключая пока малоинтересный практически случай ускоренного заряда, можно записать

$$u_0 = U_{01} + (U_{0к} - U_{01})\left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right), \qquad (210)$$

где τ—постоянная времени заряда накопителя;
ε—основание логарифмов.

Подчеркнем, что τ ни в коем случае не равна величине RC, как при заряде на постоянном токе, а будет значительно больше. Кроме того, при данных R и C она не является постоянной величиной. Величина эта и факторы, ее определяющие, будут установлены далее в результате данного анализа.

Из (202) имеем для первого полупериода заряда

$$U_{01} = E_m \sin\theta_1 \text{ и } \sin\theta = \sin\theta_1 \frac{u_0}{U_{01}}\,. \qquad (211)$$

Решая совместно (210), (211), и учитывая введенное нами обозначение $\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}}$, получим

$$\sin\theta = \sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right], \qquad (212)$$

откуда

$$\theta = \arcsin\left\{\sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\,\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right]\right\}. \qquad (212')$$

Эти равенства и выражают искомую зависимость Θ от времени. Подставляя θ и определяемый из (212) cosθ в (207) и (209), получим

$$\pi \frac{I_0 R}{E_m} = \frac{1}{t_п} \int\limits_0^{t_п} \left\{ 2 \sqrt{1 - \sin^2\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right]^2} - \right.$$

$$\left. - \sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right] \left[\pi - 2\arcsin\theta_1 \left(\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right)\right] \right\} dt; \tag{213}$$

$$\sqrt{\pi}\frac{IR}{E_m} = \sqrt{\frac{1}{t_п}\int\limits_0^{t_п} \left\{1{,}5 \sin 2 \arcsin \sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right] - \right.}$$

$$\overline{- \left(\pi - 2\arcsin\sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right]\right) \times}$$

$$\overline{\left.\times \left(1 - 0{,}5\cos 2\arcsin\sin\theta_1 \left[\alpha - (\alpha - 1)\varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right]\right)\right\} dt.} \tag{214}$$

Решение этих уравнений возможно с помощью числового графического интегрирования для разных значений угла θ и параметров α. При интегрировании полагаем $t_п = 4\tau$, выражая время t в долях τ. После интегрирования (213) и (214) и используя (211), можно получить зависимости

$$\frac{U_{01}}{E} = \sqrt{2}\sin\theta_1; \quad \frac{I_0 R}{E} = f_1(\theta_1, \alpha); \quad \frac{IR}{E} = f_2(\theta_1, \alpha). \tag{215}$$

Эти зависимости составляют систему трех уравнений с четырьмя неизвестными: θ_1, E, I, R. Что касается остальных величин, то все их можно считать известными, так как α задается, а напряжение U_{01} и ток I_0 легко вычисляются:

$$U_{01} = \frac{U_{0к}}{\alpha}, \quad I_0 = \frac{C(U_{0к} - U_{01})}{t_п}. \tag{216}$$

Решение системы (215), производимое путем счисления точек с кривых, выражаемых уравнениями (215) при параметре α, позволяет получить необходимые расчетные соотношения.

§ 32. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Прежде всего получаем зависимости

$$\frac{E}{U_{01}} = F_1\left(\frac{I_0R}{U_{01}},\ \alpha\right); \tag{217}$$

$$\frac{I}{I_0} = F_2\left(\frac{I_0R}{U_{01}},\ \alpha\right). \tag{218}$$

Графически они представляют семейства кривых при параметре α, которые позволяют при заданном R найти необходимую э. д. с. питания E $\left(\text{через отношение } \frac{E}{U_{01}}\right)$ и действующее значение тока I $\left(\text{через отношение } \frac{I}{I_0}\right)$. Введение в качестве независимой переменной отношения $\frac{I_0R}{U_{01}}$, а в качестве искомых— $\frac{E}{U_{01}}$ и $\frac{I}{I_0}$

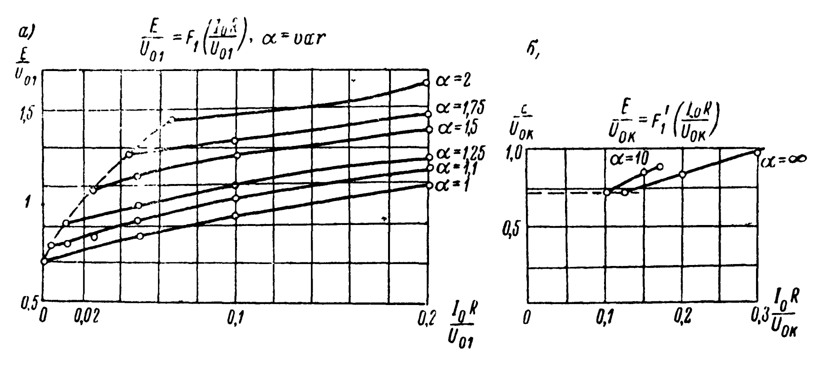


Рис. 124. График для определения вторичной э. д. с. трансформатора питания: *а* — $\alpha \leqslant 2$; *б* — $\alpha \leqslant \infty$

позволяет сделать графики по выражениям (217) и (218) универсальными, построенными в безразмерных координатах.

Графики по выражениям (217) и (218) для $\alpha \leqslant 2$ построены на рис. 124, *а* и 125 *а*. Для общности нанесены и кривые стационарного режима ($\alpha = 1$). Для случая $\alpha = \infty$ выражения (217) и (218) преобразованы, с введением вместо переменных $\frac{E}{U_{01}}$ и $\frac{I_0R}{U_{01}}$ величин $\frac{E}{U_{0\text{к}}}$ и $\frac{I_0R}{U_{0\text{к}}}$, ибо здесь $U_{01} = 0$. Графики для $\alpha = \infty$ даны также на рис. 124 и 125, *б*.

Как видно из этих рисунков, кривые при каждом α начинаются от некоторых граничных точек, соответствующих определенным значениям величины $\frac{I_0R}{U_{01}}$. Это обстоятельство объясняется тем, что в уравнениях (215) нельзя брать произвольные сочетания α и θ_1, ибо каждому α соответствует некоторое гранич-

ное значение θ_1, при котором использованные исходные уравнения имеют еще физический смысл. Действительно, угол θ не может физически превосходить величины 90°, а максимальным углом θ будет угол $\theta_к$, когда напряжение на конденсаторе максимальное: $u_0 = U_{0к}$. Но из (211)

$$\sin\theta_к = \sin\theta_1 \frac{U_{0к}}{U_{01}} = \alpha \sin\theta_1,$$

откуда

$$\sin\theta_1 = \frac{\sin\theta_к}{\alpha} \text{ и } (\sin\theta_1)_{\max} = \frac{(\sin\theta_к)\ \max}{\alpha} = \frac{1}{\alpha}.$$

Этой величине $(\sin\theta_1)_{\max}$ согласно системе (215) соответствует определенная величина $\frac{I_0 R}{U_{01}}$, которую мы назовем

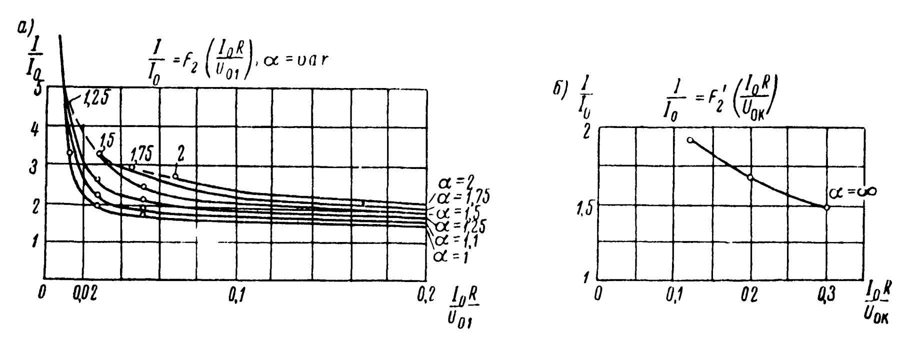


Рис. 125. График для определения действующего тока во вторичной обмотке трансформатора: *а* — $\alpha \leqslant 2$; *б* — $\alpha = \infty$.

критической и обозначим $\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$. При значении $\frac{I_0R}{U_{01}} = \left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$ будет иметь место режим полного заряда (см. рис. 122), ибо при этом $\theta_к = 90°$, т. е. заряд заканчивается как раз к концу паузы. При бо́льших значениях $\frac{I_0R}{U_{01}}$ будет $\theta_к < 90°$ — случай неполного заряда, а при меньших значениях — случай ускоренного заряда. В граничной точке $E_m \approx U_{0к} = \alpha U_{01}$, т. е. $\frac{E}{U_{01}} \approx \frac{\alpha}{\sqrt{2}}$. Очевидно, что эта величина остается постоянной в зоне

$$0 \leqslant \frac{I_0R}{U_{01}} \leqslant \left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}.$$

Найдем теперь максимальные токи — заряда I_m и начального включения I_{mm}. Очевидно, что

$$I_m = \frac{E_m - U_{01}}{R} = \frac{\sqrt{2}\,E - U_{01}}{R}, \qquad I_{mm} = \frac{E_m}{R} = \frac{\sqrt{2}\,E}{R}.$$

Разделив величину I_0 на эти выражения, получим опять-таки универсальные зависимости

$$\frac{I_0}{I_m}=\frac{1}{\frac{\sqrt{2}\,E}{I_0R}-\frac{U_{01}}{I_0R}}=\frac{\frac{I_0R}{U_{01}}}{\sqrt{2}\,\frac{E}{U_{01}}-1}, \qquad (219)$$

$$\frac{I_0}{I_{mm}}=\frac{1}{\sqrt{2}\,\frac{\frac{E}{U_{01}}}{\frac{I_0R}{U_{01}}}}=\frac{1}{\sqrt{2}}\,\frac{\frac{I_0R}{U_{01}}}{\frac{E}{U_{01}}}. \qquad (220)$$

Подставляя сюда $\frac{E}{U_{01}}$ из (217) при данных α, легко получаем семейства кривых

$$\frac{I_0}{I_m}=F_3\left(\frac{I_0R}{U_{01}},\ \alpha\right) \text{ и } \frac{I}{I_{mm}}=F_4\left(\frac{I_0R}{U_{01}},\ \alpha\right).$$

Эти кривые представлены на рис. 126, *а* и *б* для $a\leqslant 2$ и $\alpha=\infty$ и рис. 127.

Ток первичной обмотки трансформатора для данной схемы находится через действующий ток вторичной обмотки обычным путем:

$$I_1=\kappa_т I, \qquad (221)$$

где $\kappa_т$ — коэффициент трансформации,

а ток в зарядном сопротивлении

$$I_з=I. \qquad (222)$$

Таким образом, исходным для нахождения всех величин — E, I, I_1 $I_з$, I_m, I_{mm} — является параметр $\frac{I_0R}{U_{01}}$. Зная его, можно для данного α по выражениям (217), (218), (219) и (220), представленным графически, определить в относительных единицах все эти величины, а затем без труда найти и их абсолютные значения.

Открытым остался пока вопрос о выборе сопротивления R. Теперь можно разрешить и его. В самом деле, если ставится задача получить режим полного заряда, т. е. как раз к концу паузы достичь на конденсаторах напряжения $U_{0к}$, равного практически амплитудной э. д. с. трансформатора $E_m=\sqrt{2E}$, то из кривых рис. 124 можно найти для заданного α то критическое значение $\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$, которое обеспечивает реализацию такого режима.

Отсюда находим необходимое сопротивление

$$R=\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)\cdot\frac{U_{01}}{I_0}, \qquad (223)$$

причем для полного заряда $R=R_{кр}$ и $\frac{I_0R}{U_{01}}=\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$. Найденную величину сопротивления цепи R для случая полного заряда обозначим через $R_{кр}$ и назовем также критической.

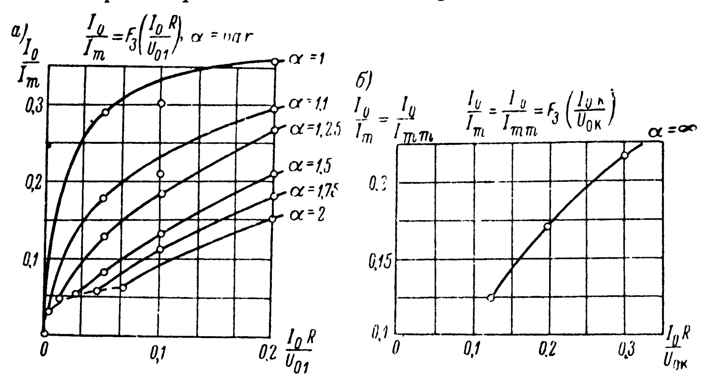


Рис. 126. График для определения максимального тока заряда: *а* — $\alpha\leqslant2$; *б* — $\alpha=\infty$.

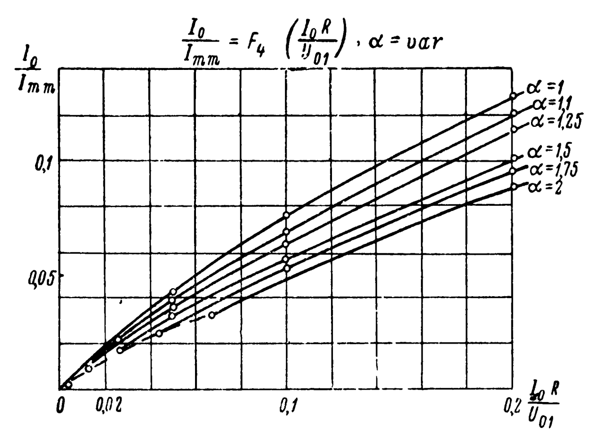


Рис. 127. График для определения тока начального включения.

Для удобства ее отыскания на рис. 128, *а* приведен в двух разных масштабах график

$$\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}=F_5(\alpha). \qquad (224)$$

На рис. 128, *б* эта зависимость представлена и в другом виде

$$\left(\frac{I_0 R}{U_{\text{ок}}}\right)_{\text{кр}} = F_5'(\alpha).$$

Полученные данные позволяют определить и реальную постоянную времени τ, с которой происходит заряд накопителя в нашем случае.

Имеем из (216)

$$t_{\text{п}} = \frac{C(U_{\text{ок}} - U_{01})}{I_0} = \frac{CU_{01}}{I_0}(\alpha - 1). \qquad (225)$$

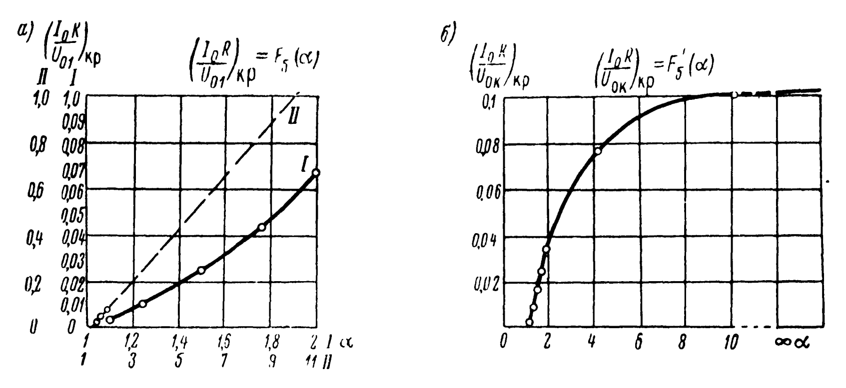


Рис. 128. График для определения критической величины основного расчетного параметра: *а* — $\alpha \leqslant 11$; *б* — $\alpha \leqslant \infty$.

I — точный отсчет; *II* — грубый отсчет.

Принимая, что $\tau = \frac{t_{\text{п}}}{4}$, и умножая числитель и знаменатель на $R_{\text{кр}}$, получим из (225)

$$\tau = \frac{1}{4} \frac{CR_{\text{кр}}}{\frac{I_0 R_{\text{кр}}}{U_{01}}}(\alpha - 1) = CR_{\text{кр}} \frac{1}{4} \frac{\alpha - 1}{\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{\text{кр}}}. \qquad (226)$$

Здесь $CR_{\text{кр}} = \tau_c$ — обычная постоянная времени заряда конденсатора. Следовательно,

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \frac{1}{4} \frac{\alpha - 1}{\left(\frac{I_0 R}{U_{c1}}\right)_{\text{кр}}} = \frac{1}{4} \frac{\alpha - 1}{F_5(\alpha)}, \qquad (227)$$

где $F_5(\alpha)$ — по (224).

Мы пришли к интересному выводу, что отличие постоянной времени заряда τ от обычной постоянной $\tau_c = RC$ для данной схемы выпрямления целиком определяется параметром α.

Подставляя в (227)

$$F_5(\alpha) = \left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{кр},$$

можно построить зависимость

$$\frac{\tau}{\tau_c} = F_6(\alpha),$$

что и сделано на рис. 129. Можно видеть, что отношение $\frac{\tau}{\tau_c}$ не есть постоянная величина и что оно значительно отличается от единицы в сторону увеличения. Таким образом, заряд накопителя через выпрямитель в нашем режиме идет значительно медленнее, нежели заряд конденсатора постоянным током. Количественные соотношения устанавливаются выражением (227) и графиком на рис. 129.

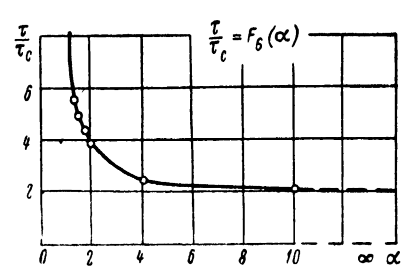


Рис 129. Зависимость отношения постоянных времени $\frac{\tau}{\tau_c}$ от величины α

Выбрать необходимый тип выпрямителя нетрудно, зная величины E, I_0, I_m.

§ 33. ВЫБОР РЕЖИМА ЗАРЯДА

Наиболее распространенным в практике является режим полного заряда. Рассмотрим два иных режима, осуществляемых уменьшением или увеличением величины R против $R_{кр}$. Совершенно ясно, что выбирать $R < R_{кр}$ (ускоренный заряд) не имеет никакого смысла, ибо это приводит лишь к неполному использованию паузы, т. е. увеличенным максимальным I_m и I_{mm} и действующему I токам при том же среднем. При этом надо учесть, что даже в режиме полного заряда ток I значительно больше среднего (см. рис. 125).

Для режима ускоренного заряда очевидны соотношения:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{0к}}{\sqrt{2}}; \quad I_m = \frac{E_m - U_{01}}{R}; \quad I_{mm} = \frac{E_m}{R}. \tag{228}$$

Токи I, I_1 и I_3 вырастут по сравнению с определяемыми по рис. 125 для точки полного заряда в $\sqrt{\frac{t_п}{t_з}}$ раз, где $t_з$ — время заряда.

Иначе обстоит дело при выборе $R > R_{кр}$. Из графиков рис. 124 и 125 можно видеть, что с ростом величины $\frac{I_0 R}{U_{01}}$, т. е. R, необходимая э. д. с. питания E растет медленно, а действующий ток падает весьма резко. Если рассмотреть произведение этих ве-

личин, определяющее габаритную мощность трансформатора $P_г = EI$, то можно найти такие значения $\frac{I_0R}{U_{01}}$, при которых мощность $P_г$ будет минимальна.

На рис. 130 представлен график

$$P_г = F_7\left(\frac{I_0R}{U_{01}},\ \alpha\right).$$

Из этого графика видно, что с отходом от критической величины $\left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$ вверх необходимая мощность питающего трансформатора (следовательно, его габариты) заметно снижается вплоть до определенных при каждом α значений $\frac{I_0R}{U_{01}}$.

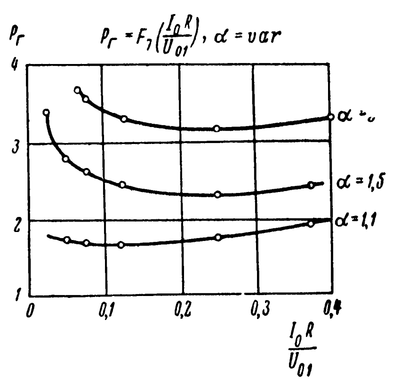


Рис. 130. К выбору оптимального режима заряда.

Отсюда следует, что R целесообразно выбирать несколько больше критического значения $R_{кр}$, т. е. осуществлять режим неполного заряда. Одновременно это позволяет уменьшить максимальный ток заряда I_m, т. е. облегчить режим работы питающей сети и выпрямителей (см. рис. 126). Еще одним существенным преимуществом режима неполного заряда является возможность выбрать сопротивление зарядной цепи R таким, чтобы ток начального включения I_{mm} не превышал допустимой для выпрямителей величины $I_{m_{доп}}$. Тогда отпадает надобность вводить на момент включения в цепь заряда дополнительное ограничительное сопротивление $R_{ог}$ с его последующим отключением, необходимость чего усложняет схему и снижает надежность ее работы. Таким образом, переход на режим неполного заряда $R > R_{кр}$, $\frac{I_0R}{U_{01}} > \left(\frac{I_0R}{U_{01}}\right)_{кр}$ позволяет решить одновременно задачи снижения габаритов питающего трансформатора и снижения максимальных токов включения и заряда. Правда, при этом растет э. д. с. E трансформатора, который обычно является высоковольтным, что усложняет выполнение его изоляции. Практика расчетов показывает, что для обеспечения допустимой величины тока включения I_{mm} необходимо такое сопротивление R, при котором напряжение E повышается на 5—25% против значения в режиме полного заряда. Во многих случаях с этой величиной можно примириться.

Недостатком режима неполного заряда является то обстоятельство, что в случае пропуска рабочего импульса, т. е. искусственного увеличения паузы, напряжение на конденсаторах накопителя будет повышаться сверх нормального, что в ряде случаев недопустимо и требует специальных мер защиты. Во всяком случае, если и нельзя обеспечить режим, при котором $I_{mm}<I_{m\text{доп}}$, то следует, как правило, стремиться к значительному снижению токов I_m и I путем некоторого увеличения величины R против $R_{\text{кр}}$ при незначительном росте напряжения питания E. Так, из рис. 124 видно, что росту E на 2% против минимально возможной величины соответствует рост R (против $R_{\text{кр}}$) в три раза для $\alpha=1{,}1$, в два раза для $\alpha=1{,}25$, в 1,5 раза для $\alpha=1{,}5$ и т. д. При этом токи I и I_m упадут соответственно почти в 3; 1,7 и 1,25 раза (см. рис. 125 и 126). Выгодность осуществления таких режимов очевидна.

§ 34. УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Однофазные и двухфазные схемы. Все сделанные выводы имеют общий характер и справедливы для любых из этих схем выпрямления. При выкладках для разных схем в отдельные выражения входили бы некоторые постоянные коэффициенты. Таким образом, все расчетные кривые (см. рис. 125—128) остаются прежними, но масштабы по осям могут меняться в некоторое число раз. То же касается подсчета токов I_1 и I_3. Основным расчетным параметром по-прежнему является величина $\frac{I_0 R}{U_{01}}$, но для некоторых схем ее необходимо опять-таки умножить на соответствующий коэффициент и уже эту новую величину брать при использовании всех графиков.

Поправочные коэффициенты (множители) для основных расчетных параметров применительно к различным схемам выпрямления, которыми надо пользоваться при работе с универсальными графиками (см. рис. 124, 125, 126, 127, 128) и формулами (221), (222), (223), приведены в табл 52. В примечаниях к таблице отмечены также те или иные особенности, которые следует иметь в виду при расчетах. Во избежание недоразумений подчеркнем, что, вычисляя по реальным I_0, R, U_0 параметр $\frac{I_0 R}{U_0}$ для пользования графиками, надо *полученную величину множить* на поправочный коэффициент. Если же этот параметр снимается с графиков, то, соответственно, *снятую с графика величину* надо на поправочный коэффициент *разделить*.

Заметим, что для удобства пользования можно сразу вычертить отдельные графики для каждой схемы по универсальным графикам и поправочным коэффициентам этой таблицы.

Таблица 52

Поправочные коэффициенты для использования универсальных графиков при расчетах различных схем выпрямления

Схема выпрямления	Поправочный множитель для параметров				
	$\frac{I_0 R}{U_0}$	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{I_0}{I_m}$ и $\frac{I_0}{I_{mm}}$	$\frac{I_1}{к_т I}$	$\frac{I_з}{I}$
Мостовая*	1	1	1	1	1
Двухполупериодная с нулевой точкой**	1	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$
Однополупериодная	2	$\sqrt{2}$	1/2	$\sqrt{1-\left(\frac{I_0}{I}\right)^2}$	1
Удвоения***	2	2	1/2	1	1
Трехфазная с нулевой точкой звезда—звезда****	2/3	$\frac{\sqrt{2}}{3}$	3/2	$\frac{8}{\pi^2}$	$\sqrt{3}$
То же, треугольник—звезда****	2/3	$\frac{\sqrt{2}}{3}$	3/2	$\sqrt{1-\left(\frac{1}{3}\frac{I_0}{I}\right)^2}$	$\sqrt{3}$
Трехфазная Ларионова, звезда—звезда*****	1/3	$\frac{\sqrt{2}}{3}$	3	1	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$

* Для мостовой схемы при вычислении сопротивления R в качестве $r_в$ брать удвоенное сопротивление одного выпрямителя.

** Для схемы с нулевой точкой э. д. с. E соответствует одной половине вторичной обмотки; коэффициент трансформации $к_т$ также берется относительно одной половины этой обмотки.

*** Для схемы удвоения весь расчет ведется на одно плечо схемы, т. е. берется удвоенная емкость C и половинные напряжения U_{01} и $U_{ок}$ по отношению к нагрузке, E получается при этом реальной для вторичной обмотки трансформатора.

**** Для трехфазной схемы выводы справедливы только при $\alpha \leqslant 2$; э. д. с. E будет фазной э. д. с. трансформатора.

***** Для схемы Ларионова выводы справедливы только при $\alpha \leqslant 1{,}15$; э. д. с. E будет линейной э. д. с. трансформатора.

Трехфазные схемы. Полученные выводы следует применять для трехфазных схем только в ограниченной зоне значений U_{01}, пока эта величина не становится ниже тех значений выпрямленной э. д. с. e, при которых пересекаются полуволны e соседних фаз, т. е. происходит коммутация вентилей. Эти значения, как известно, составляют: для схем с нулевой точкой 0,5 E_m, для схемы Ларионова 0,865 E_m. Следовательно, зона применимости найденных результатов ограничивается соотношениями $\frac{U_{01}}{E_m}$, равными 0,5 и 0,865 для этих схем соответственно. Если, как обычно, $U_{0к} \approx E_m$, то это же условие запишется как

$\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}} \leqslant \frac{1}{0,5} \leqslant 2$ для схем с нулевой точкой и $\alpha \leqslant \frac{1}{0,865} < 1,15$ для схемы Ларионова.

Таким образом, в первом случае результаты применимы практически всегда при неполном разряде накопителя. Поправочные коэффициенты для получения всех рассчитываемых величин по универсальным графикам и формулам § 32 в зонах их применимости при трехфазных схемах приведены также в табл. 52. Если α значительно больше указанных выше величин, в частности $\alpha = \infty$, то приходим практически к случаю заряда постоянным током, закономерности которого известны. Легко получить, что здесь в режиме полного заряда для схемы с нулевой точкой $\frac{I}{I_0} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$, а для схемы Ларионова $\frac{I}{I_0} = \frac{2}{\sqrt{3}}$.

§ 35. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

В соответствии с изложенным в § 30 возможны три случая расчета схемы заряда, предопределяющие и расчет трансформатора: на режим полного заряда, на допустимый максимальный ток заряда, на допустимый ток начального включения (режим ускоренного заряда как невыгодный для применения не рассматриваем).

Общая часть.

1. Исходные величины: $U_{0к}$ α, C, $t_п$, напряжение сети $U_с$. Здесь и далее все напряжения — в вольтах, токи — в амперах, сопротивления — в омах, емкости — в фарадах.

2. Находим

$$\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}} \quad \text{или} \quad U_{01} = \frac{U_{0к}}{\alpha}.$$

3. Находим по (216) I_0.

4. Находим по табл. 52 поправочные расчетные коэффициенты для выбранной схемы выпрямления. В дальнейшем, ссылаясь на тот или иной график или формулу, будем иметь в виду одновременное использование, при необходимости, этих коэффициентов.

5. Полагая предварительно, что $E_m \approx U_{0к}$, находим для данной схемы из обычных соотношений обратное напряжение на вентиле $U_{обр}$.

Расчет на режим полного заряда.

6. Находим по рис. 128 для данного α необходимую величину $\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{кр}$.

7. Находим по (223) $R = R_{кр}$.

8. Находим по рис. 124 для заданного α и полученного $\frac{I_0 R}{U_{01}}$ величину $\frac{E}{U_{01}}$ и

$$E = \left(\frac{E}{U_{01}}\right) U_{01}.$$

Можно и без вычислений принять

$$E \approx 1{,}02 \frac{U_{0к}}{\sqrt{2}}.$$

9. Находим по рис. 125 для тех же условий величину $\frac{I}{I_0}$ и

$$I = \left(\frac{I}{I_0}\right) I_0.$$

10. Находим по рис. 126 для тех же условий величину $\frac{I_0}{I_m}$ и

$$I_m = \left(\frac{1}{\frac{I_0}{I_m}}\right) I_0.$$

Иначе — вычисляем

$$I_m \approx \frac{1{,}02\, U_{0к} - U_{01}}{R}.$$

11. Находим по рис. 127 для тех же условий величину $\frac{I_0}{I_{mm}}$ и

$$I_{mm} \approx \left(\frac{1}{\frac{I_0}{I_{mm}}}\right) I_0.$$

Иначе

$$I_{mm} \approx \frac{1{,}02 U_{0к}}{R}.$$

12. По найденным I_0 и I_m и обратному напряжению $U_{обр}$ выбираем тип вентиля и, при необходимости (если I_m более допустимого для вентиля значения $I_{m_{доп}}$), число параллельно включаемых вентилей. Если параллельное включение вентилей или выбор их с большим запасом по среднему току нежелательны, необходимо перейти к расчету на допустимый ток заряда.

13. По каталогу и числу параллельно включаемых вентилей находим $r_в$.

14. Находим необходимую величину ограничительного сопротивления на момент начального включения

$$R_{ог} = \frac{\sqrt{2}\, E}{I_{m_{доп}}} - R \approx \frac{1{,}02 U_{0к}}{I_{m_{доп}}} - R.$$

15. Находим

$$K_г = \frac{E}{U_с}.$$

16. Находим $P_г = EI$ и производим конструктивный расчет трансформатора. Ток I_1 вычисляем по (221).

Определяем активное сопротивление короткого замыкания $r_к$, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора. Сопротивление необходимо привести к рабочей температуре.

17. Находим внешнее зарядное сопротивление

$$R_з = R - r_в - r_к.$$

Если окажется, что $R_з < 0$, это будет означать, что сопротивления обмоток трансформатора слишком велики и их необходимо уменьшить путем увеличения сечения проводников и, возможно, увеличения габаритов трансформатора.

18. Находим требуемую мощность сопротивления $R_з$

$$P_з = I_з^2 R_з.$$

Ток $I_з$ вычисляем по (222).

Расчет закончен.

Расчет на допустимый максимальный ток заряда.

6. Выбираем по току I_0 и обратному напряжению $U_{обр}$ тип вентиля и определяем для него $r_в$ и допустимую амплитуду тока $I_{m_{доп}}$.

7. Находим допустимое отношение

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{I_{m_{доп}}}{I_0}$$

и обратную величину $\frac{I_0}{I_m}$.

8. Находим по рис. 126 для заданного α и найденного $\frac{I_0}{I_m}$ требуемое значение $\frac{I_0 R}{U_{01}}$.

Если окажется, что величина $\frac{I_0}{I_m}$ лежит ниже граничной точки для данного α, то следует переходить к расчету на режим полного заряда.

9. Находим по (223) величину R.

10. Находим по рис. 124 для заданного α и найденного $\frac{I_0 R}{U_{01}}$ величину $\frac{E}{U_{01}}$ и

$$E = \left(\frac{E}{U_{01}}\right) U_{01}.$$

Уточняем величину $U_{обр}$ и проверяем правильность выбора вентиля.

11. Находим по рис. 125 для тех же условий величину $\frac{I}{I_0}$ и

$$I=\left(\frac{I}{I_0}\right)I_0.$$

12. Находим

$$к_г=\frac{E}{U_c}.$$

13. Находим

$$R_{ог}=\frac{\sqrt{2}\,E}{I_{m_{доп}}}-R.$$

Далее — по пп. 15—18 предыдущего случая расчета. В заключение необходимо определить максимально возможное напряжение на накопителе $E_m=\sqrt{2}\,E$.

Расчет на допустимый ток включения.

6. Выбираем по току I_0 и обратному напряжению $U_{обр}$ тип вентиля и определяем для него $I_{m_{доп}}$ и $r_в$.

7. Находим допустимое отношение

$$\frac{I_{mm}}{I_0}=\frac{I_{m_{доп}}}{I_0}$$

и обратную величину $\frac{I_0}{I_{mm}}$.

8. Находим по рис. 126 или 127 для заданного α и найденного $\frac{I_0}{I_{mm}}$ требуемое значение $\frac{I_0R}{U_{01}}$. Если окажется, что величина $\frac{I_0}{I_{mm}}$ лежит ниже граничной точки для данного α, то следует переходить к расчету на режим полного заряда.

Далее — как в предыдущем случае расчета (вычисление по п. 13 не производится).

§ 36. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1. Требуется рассчитать на режим полного заряда схему удвоения при следующих данных:

максимальное напряжение на накопителе 9000 *в*,
глубина разряда в импульсе 20%,
полная емкость накопителя 35 *мкф*, т. е. каждое плечо имеет емкость по 70 *мкф*,
время паузы между импульсами 5 сек.,
напряжение сети 220 *в*.

1. Выписываем исходные данные.

Согласно примечанию к табл. 52 берем в расчет емкость и напряжение одного плеча, т. е.

$$C=70\ мкф=70\cdot10^{-6}\ ф,\qquad U_{ок}=\frac{9000}{2}=4500\ в.$$

Остальные данные:

$$t_п = 5 \text{ сек.},$$
$$U_с = 220 \text{ в}.$$

2. Находим величину $\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}}$. Поскольку разряд идет на 20%, то $U_{01} = (1 - 0,2)\cdot U_{0к} = 0,8U_{0к}$. Отсюда $\alpha = \frac{U_{0к}}{U_{01}} = \frac{1}{0,8} = 1,25$; $U_{01} = 0,8 \times 4500 = 3600$ *в*.

3. По (216)

$$I_0 = \frac{70\cdot 10^{-6}(4500 - 3600)}{5} = 0,0126 \text{ а}.$$

4. По рис. 128 для $\alpha = 1,25$ находим $\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{кр} = 0,012.$

Для пользования (223) и нахождения реальной величины R расчетный параметр $\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{кр}$, найденный выше, необходимо *уменьшить вдвое*, поскольку для пользования графиками его надо удваивать по отношению к реальной величине (см. § 34).

5. Итак, по (223)

$$R = R_{кр} = \frac{1}{2}\cdot 0,012\frac{3600}{0,0126} = 1710 \text{ ом}.$$

6. По рис. 124,*а* для расчетной величины $\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right) = 0,012$ и $\alpha = 1,25$ находим $\frac{E}{U_{01}} = 0,9$ и $E = 0,9\cdot 3600 = 3240$ *в*.

Иначе

$$E \approx 1,02\frac{U_{0к}}{\sqrt{2}} = 1,02\cdot\frac{4500}{\sqrt{2}} = 3260 \text{ в}.$$

Как и должно быть, оба результата практически совпали.

7. По рис. 125,*а* для тех же условий находим $\frac{I}{I_0} = 4,45$. Согласно табл. 52 для схемы удвоения ток I должен удваиваться, т. е. $I = 2\cdot 4,45 \times 0,0126 = 0,112$ *а*.

8. По рис. 126,*а* для тех же условий находим $\frac{I_0}{I_m} = 0,044$. Расчетная величина этого параметра уменьшается в два раза (см. табл. 52) и

$$I_m = \frac{1\cdot 0,0126}{\frac{1}{2}\cdot 0,044} = 0,574 \text{ а}.$$

Иначе

$$I_m \approx \frac{1,02\cdot(4500 - 3600)}{1710} = \frac{980}{1710} = 0,573 \text{ а},$$

т. е. практически то же самое.

9. По рис. 127 для тех же условий находим $\frac{I_0}{I_{mm}} = 0,0095$.

Расчетное значение $\frac{1}{2} \cdot 0,0095$ и

$$I_{mm} = \frac{1}{\frac{1}{2} \cdot 0,0095} \cdot 0,0126 = 2,65 \ a.$$

Иначе

$$I_{mm} \approx \frac{1,02 \ 4500}{1710} = 2,68 \ a.$$

Опять-таки практически полное совпадение результатов.

10. По найденным I_0, I_m и $U_{обр} \approx \sqrt{2} \ E + U_{ок} = \sqrt{2} \cdot 3260 + 4500 = 9080 \ в$ выбираем по каталогу кенотрон В1 — 01/30 (во втором режиме). Для него $I_{m_{доп}} = 600 \ ма = 0,6 \ a$.

11. По каталогу $r_в = 1000 \ ом$.

12. $R_{ог} = \frac{2 \cdot 3260}{0,6} - 1710 = 7650 - 1710 = 5940 \approx 6000 \ ом$.

13. $к_т = \frac{3260}{220} = 14,8$.

14. $P_г = 3260 \cdot 0,112 = 366 \ ва$.

$I_1 = 0,112 \cdot 14,8 = 1,66 \ a$.

После конструктивного расчета трансформатора получено $r_{т2}$ 275 *ом*, $r_{т1} = 0,76$ *ома* (при рабочей температуре).

Находим $r'_{т1} = r_{т1} \cdot к_т^2 = 0,76 \cdot 14,8^2 = 167 \ ом$,

$$r_к = r_{т2} + r'_{т1} = 275 + 167 = 442 \ ома.$$

15. $R_з = 1710 - 1000 - 442 \approx 270 \ ом$.

16. $I_з = I = 0,112 \ a$;

$P_з = 0,112^2 \cdot 270 = 3,4 \ вт$.

II. Требуется рассчитать на допустимый максимальный ток заряда двухполупериодную схему с нулевой точкой при следующих данных:

напряжение на накопителе 12 000 *в*,
глубина разряда в импульсе 30%,
емкость накопителя 25 *мкф*,
пауза 2,5 сек.,
напряжение сети — 220 *в*.

1. Выписываем исходные данные:
$C = 25 \ мкф$,
$U_{ок} = 12\,000 \ в$,
$t_п = 2,5$ сек.,
$U_с = 220 \ в$.

2. При разряде 30% $U_{01} = 0,7 U_{ок} = 8400 \ в$.

$$\alpha = \frac{12\,000}{8400} = 1,43.$$

3. По (216)

$$I_0 = \frac{25 \cdot 10^{-6} (12\,000 - 8400)}{2,5} = 0,036 \ a.$$

4. При напряжении $U_{0к} = 12\,000$ *в* и применении схемы выпрямления со средней точкой обратное напряжение составит более 24 000 *в*. Учитывая также средний ток $I_0 = 0{,}036$ *а* $= 36$ *ма*, выберем в качестве выпрямителя кенотрон В1-01/30 (первый режим работы). Для него $I_{m_{доп}} = 400$ *ма* $= 0{,}4$ *а*,

$$r_в = 1000 \text{ ом}.$$

5. Допустимая величина $\dfrac{I_0}{I_m} = \dfrac{I_0}{I_{m_{доп}}} = \dfrac{0{,}036}{0{,}4} = 0{,}09.$

6. По рис. 126,*а* для $\alpha = 1{,}43$ и $\dfrac{I_0}{I_m} = 0{,}09$ находим $\dfrac{I_0 R}{U_{01}} = 0{,}05.$

7. По (223) $R = 0{,}05 \cdot \dfrac{8400}{0{,}036} = 11\,600$ *ом*.

8. По рис. 124, *а* для $\dfrac{I_0 R}{U_{01}} = 0{,}05$ и $\alpha = 1{,}43$ имеем $\dfrac{E}{U_{01}} = 1{,}1$ и $E = 1{,}1 \cdot 8400 = 9230$ *в*;

$$E_m = \sqrt{2}\, E = 13\,000 \text{ в}.$$

$U_{обр} = 2E_m = 26\,000$ *в*. Величина допустимая (для выбранного кенотрона — 30 000 *в*.)

9. Для тех же условий по рис. 125, *а* $\dfrac{I}{I_0} = 2{,}25$ и в соответствии с табл. 52

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{I}{I_0}\right) I_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2{,}25 \cdot 0{,}036 = 0{,}0575 \text{ а}$$

10. $к_т = \dfrac{9230}{220} = 42.$

11. $R_{ог} = \dfrac{\sqrt{2} \cdot 9230}{0{,}4} - 11\,600 = 32\,600 - 11\,600 = 21\,000$ *ом*.

12. $P_г = 9230 \cdot 0{,}0575 = 530$ *ва* (мощность половины вторичной обмотки).

$$I_1 = \sqrt{2} \cdot 0{,}0757 \cdot 42 = 3{,}4 \text{ а}.$$

Сопротивления обмоток после конструктивного расчета трансформатора·

$$r_{т2} = 1660 \text{ ом},$$

$$r_{т1} = 0{,}66 \text{ ом}.$$

Отсюда

$$r'_{т1} = 0{,}66 \cdot 42^2 = 1160 \text{ ом},$$

$$r_к = 1650 + 1160 = 2810 \text{ ом}.$$

13. $R_з = 11\,600 - 1000 - 2810 \approx 7800$ *ом*.

14. Согласно табл. 52

$$P_з = \left(\sqrt{2}I\right)^2 R_з = \left(\sqrt{2} \cdot 0{,}075\right)^2 \cdot 7800 = 51 \approx 50 \text{ вт}.$$

15. По п. 8 настоящего расчета максимально возможное напряжение на накопителе при увеличении паузы составит $E_m = 13\,000$ *в*.

При расчете на режим полного заряда мы бы имели

$$E_m \approx 1{,}02\, U_{0к} = 1{,}02 \cdot 12\,000 = 12\,250 \text{ в},$$

т. е. возможное увеличение напряжения на накопителе составит при расчете на допустимый ток заряда $\frac{13\,000}{12\,250} = 1{,}06$, или 6%. С этой величиной можно примириться, либо необходимо принять соответствующие меры защиты.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с теми, которые имели бы место при расчете на режим полного заряда. В последнем случае мы бы имели

$$\left(\frac{I_0 R}{U_{01}}\right)_{кр} = 0{,}02; \quad R = 0{,}02 \cdot \frac{8400}{0{,}036} \approx 4700 \text{ ом};$$

$$E = \frac{1{,}02 \cdot 12\,000}{2} = 8700 \text{ в}; \quad \frac{I}{I_0} = 3{,}6;$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}036 = 0{,}092 \text{ а};$$

$$I_m = \frac{1{,}02 \cdot (12\,000 - 8400)}{4700} = 0{,}82 \text{ а}; \quad P_г = 8700 \cdot 0{,}092 = 800 \text{ ва}.$$

При токе $I_m = 0{,}82$ *а* пришлось бы в каждое плечо включать два кенотрона параллельно (ибо $I_{m_{доп}} = 0{,4}$ *а*). Кроме того, как видим, мощность трансформатора в режиме полного заряда получается в 1,5 раза выше — 800 *ва* против 530 *ва*.

Эти два момента показывают преимущества режима неполного заряда.

ГЛАВА VII

ВЫХОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОВЫШЕННЫХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

В настоящей главе рассматриваются выходные трансформаторы, предназначенные для согласования с нагрузкой специальных генераторов повышенной и ультразвуковой частоты, оконечные каскады которых выполнены в виде двухтактных ламповых усилителей мощности или инверторных схем (коммутирующими элементами инверторов являются обычно ионные приборы, например тиратроны). При этом имеются в виду генераторы и, соответственно, трансформаторы, работающие на фиксированной частоте или в узкой полосе частот. Рабочие частоты лежат в диапазоне 1—100 *кгц*.

Подобные трансформаторы будем в дальнейшем сокращенно называть просто *выходными трансформаторами* и обозначать ВТ. Выходные трансформаторы широко применяются в ультразвуковой технике, гидроакустической аппаратуре и ряде других случаев. ВТ работают обычно на активную нагрузку (либо ее реактивные составляющие компенсируются). Выводы настоящей главы вполне приложимы к трансформаторам, рабо-

тающим, при иных указанных допущениях, и от машинных генераторов, а также к трансформаторам для ламповых генераторов иных схем, чем конкретно указываемые ниже.

§ 37. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ВТ следует дифференцировать по ряду различных признаков. Их *режим работы* может быть непрерывным, повторно-кратковременным и импульсным (см. § 2). Отношение полного времени цикла $t_ц$ ко времени рабочего импульса $t_и$ для двух последних режимов называют скважностью:

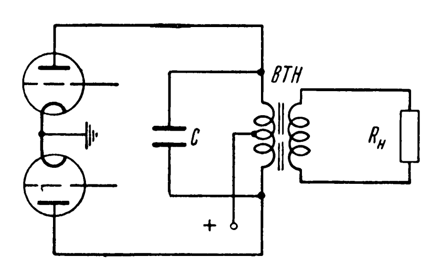


Рис. 131. Двухтактный выходной каскад с настроенным контуром, использующим ВТН.

$$Q = \frac{t_ц}{t_и} = \frac{t_и + t_п}{t_и},$$

где $t_п$ — время паузы.

В дальнейшем, если не делается оговорок, две первые группы будем объединять в понятие трансформаторов непрерывного режима.

Мощность ВТ в импульсном режиме работы может быть достаточно велика.

По исполнению ВТ встречаются два следующих принципиально различных случая. В одном случае выходной каскад усилителя мощности содержит резонансный контур, настроенный на основную частоту, причем роль индуктивности этого контура играет первичная обмотка выходного трансформатора. Поэтому индуктивность L_1 должна быть выдержана в строго определенных пределах. Во втором случае настроенный контур либо отсутствует, либо выполняется с автономной индуктивностью, а трансформатор выполняет только свои прямые функции. В этом случае величина L_1 должна быть достаточно велика, чтобы первичная обмотка не шунтировала нагрузку. ВТ первого рода условно назовем трансформаторами настраиваемыми (ВТН), второго рода — ненастраиваемыми (ВТНН). Двухтактный выходной каскад с настроенным контуром, использующим ВТН, показан на рис. 131. Инверторные схемы обычно используют ВТНН.

По электрической схеме обмоток ВТ можно разделить на следующие группы: без средних точек (схемы последовательных инверторов), со средней точкой в первичной обмотке (схемы параллельных инверторов и двухтактных усилителей мощности), со средними точками в первичной и вторичной обмотках (схемы двухтактных предоконечных каскадов), с несколькими первичными обмотками (сложные схемы инверторов). Половинки обмоток, имеющих средние точки, работают

попеременно через полпериода в соответствии с периодами проводимости ламп (рис. 131). Автономные первичные обмотки работают каждая от своего коммутирующего элемента поочередно одна за другой со сдвигом во времени, определяемым числом обмоток.

По величине напряжения ВТ большой мощности (свыше 100 *ва* в непрерывном режиме) являются высоковольтными, причем обычно чем выше мощность, тем выше и напряжение. При этом выходные напряжения инверторных схем в несколько раз ниже, чем у ламповых генераторов.

§ 38. ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В известной мере на выходные трансформаторы могут быть распространены выводы, полученные в гл. V. Поскольку при этом ВТ работают на повышенных и более высоких частотах, здесь требуется учесть все те замечания, которые относились к этому случаю по материалам глав III, IV, V.

Для трансформаторов повторно-кратковременного и особенно импульсного режимов необходимо учесть особенности теплового режима по § 16. Легко показать, что в импульсном режиме при реальных соотношениях $\frac{t_и}{T}$ (T — по данным § 16) коэффициент допустимого увеличения потерь практически равен скважности:

$$\varepsilon_p = Q \qquad (229)$$

(см. на рис. 132 кривую зависимости $\frac{\varepsilon_p}{Q}$ от Q и $\frac{t_и}{T}$).

Это открывает возможности резкого повышения электромагнитных нагрузок: плотности тока j и, несмотря на весьма высокие частоты, индукции B, что позволяет значительно снизить габариты таких трансформаторов.

У ВТН очень специфичны требования по величине индуктивности L_1. Действительно, из теории ламповых генераторов известно, что должна существовать определенная связь между волновым сопротивлением настроенного контура ωL_1 и приведенным (ко всей первичной обмотке) сопротивлением нагрузки $R'_н$. Обычно принимают $\omega L_1 \approx (2—3) R'_н$. Так как частота ω достаточно велика, а сопротивление $R'_н$ относительно мало (если не рассматривать малых мощностей), то требуемая величина L_1 оказывается очень малой — от долей миллигенри до десятков миллигенри. Такую величину индуктивности трудно обеспечить естественным путем. В самом деле,

$$L_1 = \frac{0{,}4\pi w_1^2 \kappa_c s_c \mu 10^{-8}}{l_c} \qquad (230)$$

[обозначения — по (6) и (9)].

Подставляя сюда w_1 из (9), получим при прочих заданных и постоянных величинах

$$L_1 \equiv \frac{\mu}{B} \frac{1}{s_c l_c}.$$

Поскольку вариации величин μ и B весьма ограничены, единственным эффективным средством для уменьшения L_1 оказывается увеличение объема, сердечника $V_c = s_c l_c$, т. е. габаритов трансформатора, что, конечно, невыгодно. Поэтому приходится в магнитную цепь ВТН вводить искусственный воздушный зазор. Величина его может доходить до очень больших значений — несколько сантиметров и выше. Малое значение L_1 приводит к большому намагничивающему току I_μ в первичной обмотке (контурный ток), который может даже превысить приведенный действующий ток нагрузки I. Выведем выражение полного первичного действующего тока I_1 для наиболее общего случая ВТ со средней точкой в первичной обмотке. Приведенный мгновенный ток активной нагрузки (см. § 37) i_2' протекает в каждой половине обмотки полпериода, контурный же ток i_μ, сдвинутый на 90°,— непрерывно (рис. 133), активной составляющей намагничивающего тока пренебрегаем ввиду ее малости. Мгновенный

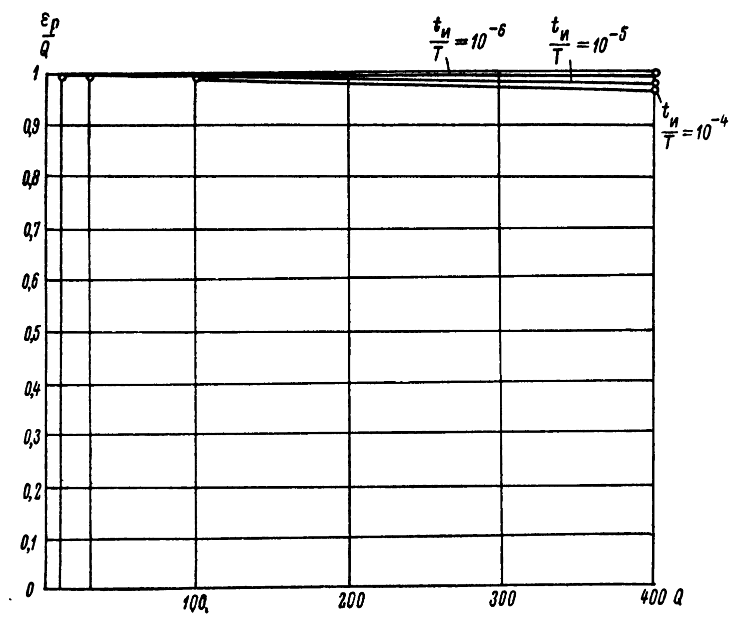


Рис. 132. К определению коэффициента допустимого увеличения потерь в импульсном режиме работы.

первичный ток в интервале от 0 до π

$$i_1 = i_2' + i_\mu = I_m \sin t + I_{\mu m} \sin(t + 90^\circ) = I_m \sin t - I_{\mu m} \cos t,$$

а в интервале от π до 2π $i_1 = -I_{\mu m} \cos t$. Отсюда

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \sqrt{\int_0^{\pi} (I_m \sin t - I_{\mu m} \cos t)^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi} (I_{\mu m} \cos t)^2 dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{I^2}{2} + I_\mu^2}. \qquad (231)$$

Рис. 133. Мгновенные токи в первичной обмотке ВТН.

Ток I приведен к половине первичной обмотки. Если ток нагрузки I_2 привести ко всей обмотке, то

$$I_1 = \sqrt{2\left(\frac{w_2}{w_1} I_2\right)^2 + I_\mu^2}, \qquad (232)$$

где

$$I_\mu = \frac{U_1}{\omega L_1},$$

U_1 — переменное напряжение, приложенное ко всей первичной обмотке.

Для ВТ с N_1 первичными обмотками аналогично можно получить

$$I_1 = \sqrt{N_1\left(\frac{w_2}{w_1} I_2\right)^2 + I_\mu^2}. \qquad (232')$$

Если обмотка одна и не имеет средней точки, то, естественно, $N_1 = 1$.

Рост тока I_1 по отношению к $I = I_2'$ характеризуется коэффициентом $\frac{I_1}{I_2 \frac{w_2}{w_1}}$. Так как для ВТН I_μ велик, то велик будет и этот коэффициент. Соответственно существенно будет расти и

габаритная мощность трансформатора $P_г$. Коэффициент ее увеличения

$$к_I = \frac{P_г}{P_{II}}$$

будет, согласно (181):

$$к_I = \frac{1 + \dfrac{I_1}{I_2 \dfrac{w_2}{w_1}}}{2}$$

(пренебрегаем потерями).

По (232) получим, учитывая, что

$$I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_1}{R'_н},$$

для ВТ со средней точкой

$$к_I = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{2 + \left(\frac{R'_н}{\omega L_1}\right)^2}\right),$$

для ВТ без средней точки (233)

$$к_I = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R'_н}{\omega L_1}\right)^2}\right).$$

Для обеспечения высокого качества передачи импульса трансформаторами следует стремиться к уменьшению их индуктивностей рассеяния как между первичной и вторичной L_s, так и между половинами первичной обмотки, если они имеются. Особенно это относится к ненастраиваемым трансформаторам.

Как показывает опыт, желательно выдерживать

$$\omega L_s \leqslant 0{,}15 R'_н, \tag{234}$$

а для предоконечных трансформаторов

$$\omega L_s \leqslant 0{,}05 R'_н. \tag{234'}$$

Получение удовлетворительных результатов по влиянию рассеяния тем труднее, чем меньше сопротивление нагрузки. Для настраиваемых трансформаторов ввиду фильтрующего действия контура индуктивность рассеяния такой важной роли не имеет.

Следует отметить, что у ВТНН нужно обращать внимание и на величину L_1, не допуская ее чрезмерного увеличения, так как это может вызвать паразитные резонансы с распределенными емкостями обмоток, которые, в свою очередь, следует по возможности уменьшать. Строгий количественный учет влияния паразитных параметров на качество работы выходного каскада с ВТ крайне затруднителен, тем более, что это влияние тесно

связано со схемой, параметрами и рабочей частотой лампового генератора (инвертора). Поэтому приходится в этом отношении опираться на данные опыта.

Что касается геометрии сердечников для ВТ, то здесь из-за разнообразия требований не представляется возможным дать такие четкие и конкретные рекомендации, как в случае силовых трансформаторов. Положение осложняется тем, что часто главную роль приобретают чисто конструктивные требования со стороны обеспечения надежной изоляции из-за высоких рабочих напряжений этих трансформаторов. Для размещения изоляции требуется много места. Поэтому отношение $\frac{s_{ок}}{s_c}$ для сердечников ВТ оказывается значительно большим, чем обычно у силовых трансформаторов (см. § 20, табл. 29). Величину y желательно не брать заметно больше единицы, поскольку для трансформаторов повышенной частоты это невыгодно (см. § 20, рис. 90, табл. 27). Соотношение сторон окна $\frac{h}{c}$ желательно иметь бо́льшим для уменьшения рассеяния. Ряды сердечников, применяющиеся для ВТ, будут приведены ниже, в § 42.

§ 39. СЕРДЕЧНИКИ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Учитывая диапазон рабочих частот, можно сделать вывод, что для современных ВТ лучшей конструкцией сердечника является ленточный сердечник из тонкой ленты из высококачественного магнитного материала (см. главы II—IV). Понятно, что для реализации больших индукций и тем самым сокращения габаритов ВТ, а также для получения высокого к. п. д. необходимо иметь материал с возможно меньшими удельными потерями на рабочих частотах. Для ВТНН, где необходимо иметь значительную величину L_1, важна также магнитная проницаемость μ.

По данным табл. 4, 7 и рис. 46 видно, что наилучшими свойствами в этих отношениях обладают железоникелевые сплавы 80НХС и 79НМ при толщине 0,05 *мм* (лента толщиной 0,02 *мм* малотехнологична). Однако это справедливо только для ВТ непрерывного режима. В импульсном же режиме преимущества этих сплавов по потерям теряются, так как высокие индукции не могут быть реализованы из-за относительно низкой индукции насыщения (около 7000 *гс*). Поэтому для ВТ импульсного режима лучшим оказывается сплав 50Н, имеющий бо́льшие удельные потери и значительно бо́льшую индукцию насыщения (15 000 *гс*). Оптимальная толщина 0,05 *мм* (при частотах низшего предела 0,05—0,1 *мм*). Перспективны также холоднокатаная сталь 3СТА (толщина — 0,05 *мм*) и сплав 33НКМС. При относительно низких частотах в ряде случаев удается применять и обычную хо-

лоднокатаную сталь (толщины 0,05—0,08 *мм*). Применявшуюся длительное время горячекатаную сталь Э44 0,2—0,1 *мм* следует теперь считать устаревшей, тем более что шихтовка магнитопроводов из таких тонких пластин представляет большие трудности.

Для того чтобы определить, в каких случаях какой материал рационально применять, построим на рис. 134 по выражению (142) зависимость индукции от мощности для трансформаторов с сердечниками из сплава 50Н при различных частотах и различных скважностях. Перегрев $\Delta\tau_к$ примем равным 35°. Учет

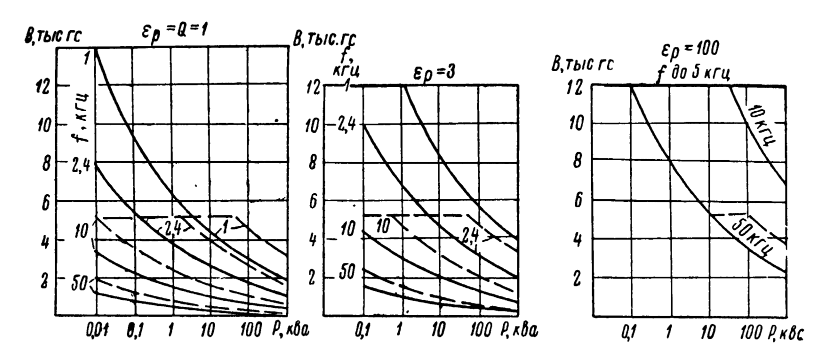


Рис. 134. К выбору материала сердечника для выходных трансформаторов.
——— 50Н, - - - - - 80НХС.

скважности Q в (142) заключается в том, что поскольку согласно (229) потери в сердечниках могут быть увеличены в Q раз, удельные потери p_{10} могут быть снижены при расчете B в Q раз. Точки, в которых индукция превышает 6000—7000 *гс*, будут соответствовать случаям, когда рационально применять сплав 50Н, а не 80НХС.

При расчете кривых принята некоторая «средняя геометрия» для применяющихся тороидальных сердечников (см. § 42, табл. 53). Так как согласно (5) у разрезных ленточных сердечников p_c в $\kappa_р$ раз выше, индукции при тех же мощностях должны быть здесь приняты меньшие и применение сплава 80НХС оказывается рациональным и при несколько меньших мощностях, чем по рис. 134. Это не относится, однако, к конструкции ВТ с радиально расположенными сердечниками (см. гл. II, § 4, рис. 38). В силу развитой поверхности охлаждения сердечников здесь оказывается возможным значительное увеличение индукции и зона использования сплава 80НХС сдвигается существенно в сторону бóльших мощностей. При использовании для сердечников горячекатаной стали Э44 0,1 *мм* индукции необходимо снижать в 1,5—2 раза по сравнению со

сплавом 50Н и в 2,5—3,5 раза по сравнению со сплавом 80НХС. Исследуются возможности применения новейших материалов — стали 3СТА и сплава 33НКМС.

Большое влияние на характеристики ВТН оказывает вводимый в сердечник воздушный зазор δ_0. Ввиду его большой величины (см. § 38) происходит выпучивание силовых линий, что приводит к уширению сечения зазора s_δ по сравнению с сечением сердечника s_c (рис. 135, *а*). Вследствие этого эффективность введения зазора уменьшается и реальная индуктивность L_1 при зазоре δ_0 оказывается завышенной по сравнению с расчетной по (230), если по (6) принять $\mu = \mu_{эфф}$.

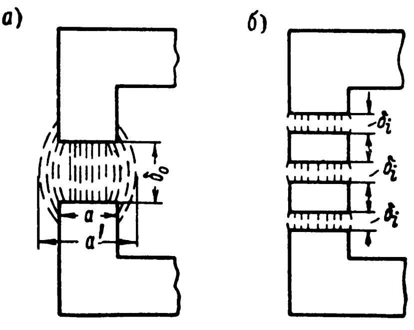


Рис. 135. К явлению выпучивания магнитного потока в зазоре ВТН.

Если пренебречь явлением выпучивания и подсчитать необходимый односторонний зазор из (230) и (6), полагая, что $\frac{1}{\mu} \ll \frac{2\delta}{l_c}$, то

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{0{,}4\pi w^2 s_c}{L_1 10^8}.$$

Реальный же зазор, который обеспечивает получение индуктивности L_1, будет в κ_δ раз больше:

$$\delta_0 = \kappa_\delta \delta. \tag{235}$$

Точный расчет κ_δ представляет большие трудности. Можно ограничиться подсчетом κ_δ по экспериментальной формуле

$$\kappa_\delta = \sqrt{\frac{1 + 10\delta}{0{,}9}}, \tag{236}$$

где δ — в *см*.

Для наибольшей эффективности и обеспечения максимальной симметрии зазор должен располагаться в центре стержня с катушкой, но не с края и тем более не в ярме. При очень малых L_1 может оказаться, что величина зазора близка к высоте обмотки и практически от сердечника остаются только замыкающие ярма (для стержневого трансформатора). При очень больших зазорах и броневом типе трансформатора может оказаться целесообразным в ряде случаев отказ от замкнутого магнитопровода и выполнение его в виде разомкнутого стержня, вставленного внутрь катушки.

Выпучивание линий в зазоре сердечника, помимо необходимости увеличивать зазор по (235), приводит к такому нежела-

тельному явлению, как увеличение потерь в сердечнике p_c. Действительно, у торцов сердечника крайние пучки магнитных линий входят в сердечник не вдоль ленты (листа), а поперек ее, что способствует развитию в этой зоне сильных вихревых токов. В результате p_c дополнительно увеличиваются в $к_{p\delta}$ раз. Ориентировочно

$$к_{p\delta} \approx 1{,}4. \quad (237)$$

Особенно вредно влияние этого эффекта для трансформаторов непрерывного режима, где вызванный им сильный местный нагрев торцовой зоны сердечника может стать недопустимым. При импульсном режиме работы во время паузы за счет теплопроводности сердечника происходит выравнивание температур.

С явлением выпучивания потока в зазоре и вытекающими отсюда последствиями можно бороться путем дробления суммарного зазора на ряд последовательно включенных меньших зазоров δ_i (рис. 135, *б*). Соответствующим выбором числа зазоров можно добиться практического отсутствия выпучивания магнитных линий и тогда $\delta_0 \approx \delta = \Sigma\delta_i$; $к_\delta \approx 1$; $к_{p\delta} \approx 1$. Однако введение нескольких зазоров сильно усложняет конструкцию трансформатора и приводит, в свою очередь, к увеличению потерь p_c за счет увеличения числа резов ленточного сердечника (или пластин шихтованного сердечника). Целесообразность такого решения требует дополнительного изучения.

При проектировании ВТ непрерывного режима необходимо обратить внимание на следующее интересное явление. Как уже отмечалось в § 11, из-за разницы длин крайних магнитных линий возникает неравномерность распределения индукции по сечению сердечника. В рассматриваемом случае это явление значительно усиливается, поскольку работать обычно приходится при индукциях, лежащих левее максимума магнитной проницаемости μ по кривой μ *(В)*, и увеличение *В* по внутренней магнитной линии приводит к дополнительному снижению магнитного сопротивления из-за роста μ и еще большему росту индукции. В итоге при допустимых суммарных потерях может наблюдаться местный перегрев внутренних частей сердечника. В импульсных режимах за время паузы температуры выравниваются.

Технология изготовления и конструкции сердечников рассматривались в гл. II и IV (§ 4, 8—10).

§ 40. КАТУШКИ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для ВТ могут применяться тороидальный, броневой и стержневой типы конструкций. В целях уменьшения рассеяния катушки должны выполняться концентрическими, иногда — чере-

дующимися (см. § 4). На конструктивное оформление обмоток большое влияние оказывает необходимость обеспечения высокой электрической прочности.

Для ВТНН предпочтительно применение замкнутых ленточных сердечников, обеспечивающих высокие значения индуктивности L_1 и минимально возможные потери p_c. Наиболее распространены из них тороидальные трансформаторы ТТ. Обмотки здесь должны располагаться равномерно вдоль сердеч-

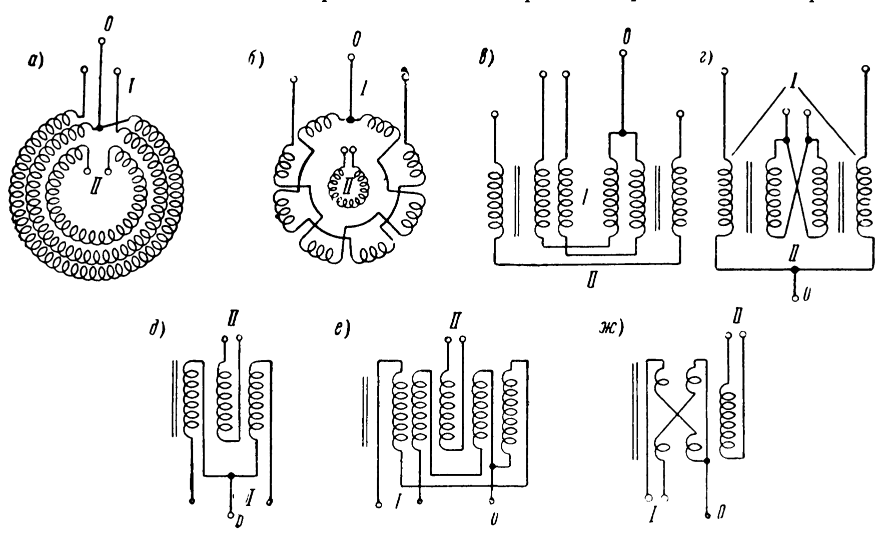


Рис. 136. Способы расположения обмоток выходных трансформаторов: *а, б* — для ТТ; *в, г* — для СТ; *д, е, ж* — для БТ.

ника. Если обмотка имеет среднюю точку, вдоль всего сердечника должна размещаться каждая половина обмотки, желательно в целое число слоев (рис. 136, *а*). Делается это для улучшения связи между обмотками и их половинами. Для обеспечения полной симметрии половинок первичной обмотки по отношению ко вторичной можно прибегать к перекрестно-секционированному выполнению первичной обмотки (рис. 136, *б* и 16). Достоинством этого способа, как и секционированной обмотки вообще, является снижение межслоевых напряжений, недостатком — полное напряжение между обмоткой и сердечником и трудность выполнения перемычек между секциями. Конструкции тороидальных ВТ показаны на рис. 14—16.

У стержневых трансформаторов СТ теоретически наилучшим вариантом размещения обмоток при наличии средней точки является разбивка вторичной обмотки (или каждой ее половины) и каждой половины первичной обмотки на две части, располагаемые на разных стержнях и соединяемые последова-

тельно, причем для каждой половины одна часть располагается ближе к сердечнику, другая — дальше (рис. 136, *в*). Серьезным недостатком этого способа является конструктивная сложность, появление лишнего изоляционного промежутка на полное рабочее напряжение и, как следствие, увеличение размеров окна и рассеяния.

Простотой отличается способ, когда каждая половина первичной обмотки находится на своем стержне, а вторичная разбивается на две части, расположенные на разных стержнях и соединяемые для обеспечения полной связи с каждой половиной первичной обмотки обязательно параллельно (рис. 136, *г*). Эта схема обеспечивает полную симметрию и на практике дает хорошие результаты. Однако ее органическим недостатком является наличие уравнительного тока во вторичной обмотке. Он вызван небалансом э. д. с., индуктируемых в частях вторичной обмотки вследствие плохой связи между работающей в данный полупериод полуобмоткой и расположенной на другом стержне частью вторичной обмотки. Уравнительный ток приводит к росту полного действующего тока во вторичной обмотке, увеличению потерь в катушках в $к_к$ раз и снижению к. п. д. Уравнительный ток особенно заметен у ВТН, поскольку наличие зазора сильно увеличивает рассеяние между стержнями. Ориентировочно на основании экспериментальных данных можно принять:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{для ВТНН} & к_к=1{,}2; \\ \text{для ВТН} & к_к=1{,}35. \end{array}\right\} \qquad (238)$$

У броневых трансформаторов ненастраиваемых обмотки располагают вдоль стержня с учетом всех тех замечаний, что были сделаны для ТТ (рис. 136, *д*). Для улучшения симметрии вторичную обмотку можно расположить между полуобмотками первичной. Наилучший результат можно получить, дробя каждую половину первичной обмотки на две части и помещая вторичную между этими частями. При этом вторая часть полуобмотки, у которой первая часть располагалась непосредственно на сердечнике, должна быть отнесена наиболее далеко и наоборот (рис. 136, *е*). Однако для настраиваемых трансформаторов, где зазор сильно увеличивает имеющуюся несимметрию, даже этот способ полной симметрии не обеспечивает, первые же варианты вообще непригодны. Для этого случая может быть рекомендовано расположение обмоток по рис. 136, *ж*, когда полуобмотки транспозируются двумя частями по высоте стержня. Если вторичная обмотка тоже имеет среднюю точку, ее следует выполнить таким же образом.

Особо тщательное обеспечение симметрии важно для ВТ предоконечных каскадов. Для уменьшения паразитных емкостей, что важно при верхних частотах рассматриваемого диапазона,

обмотку целесообразно выполнять секционированной с последовательным соединением секций. Расчет рассеяния ВТ ведется обычными методами (см. п. 28, § 28). При наличии во вторичной обмотке параллельных ветвей для расчета рассеяния необходимо воспользоваться известной эквивалентной схемой трехлучевой звезды, как это делается для трехобмоточных трансформаторов.

Относительно выбора типа конструкции на основе ранее сказанного могут быть сделаны следующие рекомендации. Для ВТНН предпочтительны ТТ (при малом числе обмоток), однако если допустимо соответствующее снижение эффективной магнитной проницаемости по (6), возможно применение и СТ и БТ (желательно на разрезных ленточных сердечниках). Это может создать технологические преимущества, хотя дает проигрыш в весах и габаритах. Для ВТН могут применяться только последние два типа. Из них при отсутствии средних точек в обмотках выгоднее СТ (см. § 22). При наличии средних точек в обмотках лучшим может оказаться БТ, особенно при большом количестве выводов (отводов), размещение которых у СТ из-за двух катушек встречает конструктивные затруднения. При больших мощностях БТ целесообразно выполнять с радиально расположенными сердечниками по рис. 38.

Заметим, что ввиду сложности вопроса, специфичности условий работы и часто возникающих специальных требований выбор оптимального типа ВТ должен обосновываться каждый раз на основе заданных конкретных условий.

Выбор проводов для ВТ осуществляется по § 7. При больших токах в обмотках часто приходится прибегать к тонкой медной ленте, а иногда и к медным трубкам. В настоящее время в ГДР выпущен расщепленный гибкий высокочастотный провод «литцендрат» больших активных сечений — до 50 $мм^2$. Разработка подобных проводов ведется и в СССР.

Конструкции и технологии изготовления катушек и их выводов были рассмотрены в главах II и IV (см. § 4, 12).

§ 41. ТРАНСФОРМАТОР В СБОРЕ

Конструкции ВТ принципиально не отличаются от описанных в гл. II. Конструкции на ленточных сердечниках для ВТ являются особенно рациональными и прогрессивными. Применение подобных конструкций с использованием высококачественных магнитных сплавов, изоляции с помощью термореактивных компаундов вместо масла и реализация соответствующих высоких электромагнитных нагрузок позволили уменьшить веса и габариты выходных трансформаторов в несколько раз. На рис. 137 приведены для иллюстрации фотографии старого и новых ВТ при одинаковых электрических данных.

§ 42. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Расчет ориентируется на ряды сердечников, все основные параметры которых известны. Применяющиеся для ВТ ряды сердечников приведены — тороидальных в табл. 53, П-образных для СТ и БТ — в табл. 54. В табл. 54 приведены, в частности, и сердечники для БТ конструкции по рис. 38.

Выбор типоразмера сердечника. Аналогично силовым трансформаторам (см. § 27) выбор сердечника производится путем сопоставления габаритной мощности трансформатора $P_г$ с габаритной мощностью типоразмера сердечника $P_т$. При этом

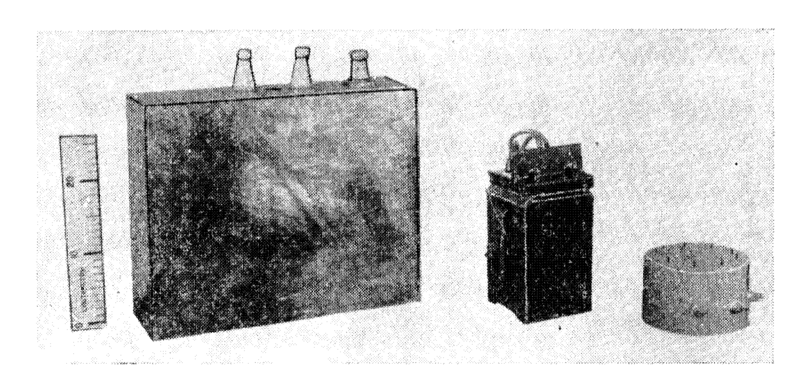


Рис. 137. Современные выходные трансформаторы в сравнении с применявшимися ранее (при одинаковых электрических данных).

$P_г = к_I P_{II}$, где $к_I$ — по (233), P_{II} — по (180). Ориентировочно на основании имеющих место практически соотношений $\frac{R'_н}{\omega L_1}$ можно принимать: для ВТНН без средних точек

$$к_I = 1, \qquad (239)$$

для ВТНН со средней точкой или несколькими первичными обмотками

$$к_I = 1{,}2, \qquad (239')$$

для ВТН

$$к_I = 1{,}75. \qquad (239'')$$

Мощность $P_т$ определяется принципиально так же, как для силовых трансформаторов повышенной частоты (см. § 27, 28) с учетом увеличения потерь $p_с$ в $к_p к_{p\delta}$ раз, и потерь $p_к$ в $к_к$ раз. Здесь $к_p = к_{раз}$ — по табл. 16, $к_{p\delta}$ — по § 39 и выражению (237), $к_к$ — по (238). Трудность расчета $P_т$ состоит в многообразии режимов работы по частоте f и скважности Q.

Таблица 53

Тороидальные ленточные сердечники для выходных трансформаторов

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*: a	b	d	D	Справочные величины: l_c, *см*	s_c, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_c s_{ок}$, *см*^{4}	G_c, *кг*	Данные для электрического расчета: $к_{ок}$	$10^3\ \alpha_к$, *вт/см*$^2\cdot{}^\circ C$	$P_{т0}$, *ква* ($Q = 1$, $\varepsilon_р = 1$): 80 НХС, $f_0 = 6$ *кгц*	50Н, $f_0 = 20$ *кгц*
I	1	ОЛ35×59×10	12	10	35	59	14,8	1,2	9,6	12	0,11	0,05	0,90	0,14	0,10
II	2	ОЛ50×75×10	12,5	10	50	75	19,7	1,25	19,6	25	0,17	0,1	0,80	0,34	0,25
	3	20		20				2,5		49	0,32		0,75	0,45	0,33
	4	30		30				3,75		72	0,5		0,70	0,54	0,38
III	5	ОЛ70×100×20	15	20	70	100	26,7	3	38,4	115	0,51	0,1	0,70	0,98	0,73
	6	40		40				6		230	1		0,65	1,35	0,93
IV	7	ОЛ100×150×20	25	20	100	150	39,3	5	78,5	290	1,24	0,1	0,65	1,76	1,25
	8	30		30				7,5		600	1,83		0,60	2,9	2,1
	9	40		40				10		785	2,48		0,60	3,3	2,4
	10	60		60				15		1180	3,7		0,55	3,6	2,7

Примечание. Принято $к_c$=0,75; γ_c=8,35.

Таблица 54

Стержневые разрезные ленточные сердечники для выходных трансформаторов

№ группы ряда	№ сердечника	Обозначение сердечника	Основные размеры, *мм*				Справочные величины				
			a	*b*	*c*	*h*	$l_с$, *см*	$s_с$, *см*^{2}	$s_{ок}$, *см*^{2}	$s_с\, s_{ок}$, *см*^{4}	$G_с$, *кг*
I	1	ПЛ15×10×30	15	10	10	30	12,7	1,5	3	4,5	0,12
II	2	ПЛ15×10× 50	15	10	20	50	18,7	1,5	10	15	0,18
	3	100		10	40	100	32,7		40	60	0,31
III	4	ПЛ20×20×64	20	20	50	64	29,1	4	32	128	0,73
IV	5	ПЛ30×20×120	30	20	40	120	41,4	6	48	288	1,55
	6	30×100		30	64	100	42,2	9	64	576	2,40
V	7	ПЛ35×30×200	35	30	84	200	67,8	10,5	168	1764	4,45
	8	390				390	106		328	3444	6,95
VI	9	ПЛ45×30×150	45	30	64	150	57	13,5	96	1296	4,81
	10	200				200	67		128	1728	5,65
	11	390				390	105		250	3375	8,90

Примечание. См. прим. к табл. 53.

Возможность увеличения в ε_p раз потерь (см. § 16) означает согласно (17) и (67) возможность увеличения в $\sqrt{\varepsilon_p}$ раз величин j и B и, следовательно, увеличения $P_т$ в $\sqrt{\varepsilon_p}\sqrt{\varepsilon_p} = \varepsilon_p$ раз [по (11)]. Если учесть также зависимость $P_т$ от f и $\Delta\tau_к$ по (77) и p_{10} от f по (3), то можно получить, что при данных размерах (для данного типоразмера)

$$P_т \equiv \varepsilon_p \Delta\tau_к f^{1-\frac{x}{2}}. \qquad (240)$$

Введем понятие характерной мощности $P_{т0}$, определяемой для непрерывного режима ($Q = 1$, $\varepsilon_p = 1$) при фиксированном перегреве $\Delta\tau_{к0}$ и некоторой фиксированной частоте f_0. Если для

рассчитываемого трансформатора аналогично определить характерную габаритную мощность $P_{г0}$, то по (240)

$$P_{г0}=\frac{1}{\varepsilon_p}\frac{\Delta\tau_{к0}}{\Delta\tau_к}\left(\frac{f_0}{f}\right)^{1-\frac{\varkappa}{2}}P_г.$$

Очевидно, выбор сердечника можно произвести путем сопоставления характерных мощностей $P_{т0}$ и $P_{г0}$. В табл. 53 приведены характерные мощности типоразмеров при $\Delta\tau_{к0}=35°$ и двух различных условиях: материал сердечника — сплав 80НХС 0,05 *мм*, $f_0 = 6$ *кгц* и материал сердечника — сплав 50Н 0,05 *мм*, $f_0 = 20$ *кгц*.

Для пользования таблицей надо рассчитывать величины

$$P_{г0}=P_г\frac{35}{\Delta\tau_к}\sqrt[4]{\frac{6}{f_{кгц}}}$$

для непрерывного режима и

$$P_{г0}=P_г\frac{35}{\Delta\tau_к}\sqrt[4]{\frac{20}{f_{кгц}}\frac{1}{Q}}$$

— импульсного режима работы [принято по (3)—(4) $\varkappa=1{,}5$]. При повторно-кратковременных режимах надо вместо Q подставить ε_p $P_г$ — в *ква*. В таблице приведены также типовые коэффициенты заполнения окна $\kappa_{ок}$, при которых велся расчет, и другие необходимые расчетные величины. Все обозначения в таблице и ниже — те же, что для силовых трансформаторов (см. § 26—28).

Электрический расчет. После выбора типоразмера расчет ведется в следующей последовательности.

1. Допустимые полные потери в трансформаторе

$$\sum p_{доп.}=\alpha_к\Pi_к\Delta\tau_к\left(1+\beta\sqrt{\nu}\right)\varepsilon_p,$$

где $\alpha_к$, β, $\Pi_к$ по (45)—(46) и табл. 53 и 26; $\Delta\tau_к$ — задано; $1\leqslant\lambda\leqslant\nu_0$, ν_0 — по (106), ε_p — по § 16, рис. 78 и выражению (229).

2. Допустимые учитываемые потери

$$\sum p_{доп_у}=\frac{1}{\kappa_{ну}}\sum p_{доп}.$$

Коэффициент $\kappa_{ну}$ отражает наличие неучитываемых потерь в изоляции и за счет эффекта близости. Ориентировочно $\kappa_{ну}\approx1{,}25$.

3. Потери в сердечнике и катушках (предварительно)

$$p'_к=\frac{\sum p_{доп_у}}{1+\nu}\ \textit{вт};\quad p'_с=\nu p_к\ \textit{вт}.$$

4. Допустимые удельные потери в материале сердечника

$$p_i' = \frac{1}{G_c} \frac{p_c'}{к_{раз} к_{p\delta}},$$

где G_c — по табл. 53 или 54, *кг*; $к_{раз}$ — по табл. 16, для ВТНН $к_{p\delta} = 1$, для ВТН $к_{p\delta}$ — по (237).

5. Индукция в сердечнике.

При заданной частоте f и найденным удельным потерям p_i' для выбранного сорта и толщины материала по рис. 47 находится индукция B'. Для нахождения B' следует по рис. 47 определить вспомогательную величину потерь p_n' при частоте f и том значении индукции B_n, для которого построены графики потерь. Тогда согласно (2)

$$B' = B_n \sqrt{\frac{p_i'}{p_n'}}.$$

Если полученное значение индукции B' не превышает 0,8—0,85 от индукции насыщения, то оно и принимается в расчет: $B = B'$. Если это условие не выполняется, то индукция B должна быть ограничена указанным пределом, т. е. величиной не более 5500—6000 *гс* для сплава 80НХС и не более 11 500—12 500 *гс* для сплава 50Н.

6. Потери в сердечнике

$$p_c = p_c' \left(\frac{B}{B'}\right)^2.$$

7. Число витков на 1 *в* э. д. с.

$$\frac{w}{E} = \frac{10^8}{4{,}44 f к_c s_c B} \text{ виток}/в,$$

где $к_c$, s_c — по табл. 53 или 54.

8. Числа витков обмоток: первичной

$$w_1 = \frac{U_1}{к_u} \frac{w}{E},$$

вторичных

$$w_i = к_u U_i \frac{w}{E},$$

где коэффициент падения напряжения принимается равным: для ВТНН $к_u = 1{,}05$, для ВТН $к_u = 1{,}1$.

9. Плотность тока (предварительно)

$$j = \sqrt{\frac{p_к'}{\rho к_{ок} V_к к_j}},$$

где $к_{ок}$, $V_к$ — по табл. 53, 26, ρ — при температуре 75° (см. § 28, п. 12).

Коэффициент $к_j$ учитывает распределение проводников в объеме трансформатора. Для СТ и БТ $к_j = 1$, для ТТ $к_j \approx 0{,}5$.

10. Первичный ток I_1. Определяется по (232). Если L_1 не задается, можно принять $I_\mu = 0$.

11. Провода и изоляция катушек. Выбираются в соответствии с указаниями в § 40. Сечения проводов q_i выбираются по стандартам (см. табл. 11, § 7) **ближайшими к величинам**

$$q_i' = \frac{I_{iк}}{j'},$$

где

$$I_{iк} = \sqrt{к_к} \cdot I_i,$$

$к_к$ — по (238). Если для выбранного провода коэффициент увеличения сопротивления за счет поверхностного эффекта (см. рис. 51) и эффекта близости заметно больше единицы, необходимо заменить провод двумя или несколькими параллельными меньшего сечения (допустимого) или применить расщепленные высокочастотные провода (литцендрат).

12. Конструкция катушек — по § 4, 40. После размещения обмоток подсчитываются их сопротивления R_i при 75°.

При предварительном расчете определяется

$$к_{ок} = \frac{\sum_{i=1}^{N} q_i w_i}{s_{ок}}.$$

Величина $к_{ок}$ не должна превышать 0,1—0,15.

13. Индуктивность рассеяния между обмотками L_s. Подсчитывается по (21) и (§ 28, п. 28). В (21) подставляется число витков всей обмотки. Должны быть соблюдены условия (234).

Если эти условия не выполняются, следует перейти к типоразмеру, имеющему большее сечение сердечника s_c.

14. Индуктивность первичной обмотки L_1 для ВТНН. Подсчитывается по (230) при $\mu = \mu_{эфф}$ по (6). Для ТТ $\delta = 0$, для СТ и БТ $\delta \leqslant 1{,}5 \times 10^{-3}$ *см*. Величина μ в (6) берется ориентировочно равной μ_0 по рис. 46.

Если L_1 меньше допустимой по заданию величины, необходимо уменьшить индукцию и повторить расчет. Если при этом размещение обмоток не обеспечивается (см. п. 12), необходимо перейти к большему типоразмеру и также уменьшить индукцию по сравнению с допустимой по тепловому режиму.

Если L_1 значительно больше заданной величины, также необходимо перейти к большему типоразмеру сердечника.

15. Зазор в сердечнике для ВТН (односторонний). Определяется по (235) — (236) и указаниям § 39.

16. Потери в катушках

$$p_к = к_к \sum_{i=1}^{N} \frac{r}{r_=} I_i^2 R_i,$$

где $\frac{r}{r_=}$ по рис. 51, при отсутствии параллельных ветвей в обмотках $к_к = 1$, при их наличии — $к_к$ по (238).

17. Перегрев катушек

$$\Delta\tau_к = \frac{к_{ну}(p_к + p_с)}{\alpha_к \varepsilon_p П_к (1 + \beta \sqrt{\nu})},$$

где $\nu = \frac{p_c}{p_к}$, $\alpha_к$, β, $П_к$, ε_p — по п. 1, $к_{ну}$ — по п. 2. Если $\Delta\tau_к$ выше допустимой величины, необходимо перейти к большему типоразмеру сердечника и повторить расчет заново. Если $\Delta\tau_к$ значительно (на 25—50%) ниже допустимой величины и это не вызвано преднамеренным завышением типоразмера из условий обеспечения L_s или L_1 (пп. 13, 14), то можно перейти к меньшему типоразмеру и повторить расчет заново.

18. К. п. д.

$$\eta = 1 - \frac{к_{ну}(p_к + p_с)}{P_{II} + к_{ну}(p_к + p_с)}.$$

В заключение целесообразно рассчитать режим испытаний в непрерывном режиме на какой-либо стандартной частоте (например, 400 *гц*) для контроля коэффициентов трансформации и качества магнитной цепи трансформатора. Подводимое напряжение рассчитывается из условия получения в испытательном режиме индукции, примерно равной рабочей индукции B.

На этом расчет заканчивается.

§ 43. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные: настраиваемый ВТ со средней точкой в первичной обмотке импульсного режима работы со скважностью $Q = 100$; $f = 15$ *кгц* $P_{II} = 90$ *квт*, $U_1 = 9200$ *в*, $U_2 = 570$ *в*, $I_2 = 160$ *а*, $\Delta\tau_к = 45°$, $L_1 = 0{,}015$ *гн*. Согласно § 42 $к_f = 1{,}75$ и $P_г = 1{,}75 \cdot 90 = 157$ *ква*.

Для ВТН импульсного режима при данной частоте выбираем разрезной ленточный сердечник стержневого типа из сплава 50Н 0,05 *мм*.

Для выбора типоразмера рассчитаем характерную габаритную мощность $P_{г0} = 157 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{35}{45} \cdot \sqrt[4]{\frac{20}{15}} = 1{,}3$ *ква*. Этой мощности соответствует сердечник № 6 по табл. 54.

Необходимые для расчета параметры, характеризующие данный типоразмер: $к_{ок} = 0{,}1$; $к_с = 0{,}75$; $\alpha_к = 0{,}9 \cdot 10^{-3}$ *вт/см*^{2} °C; $s_с = 9$ *см*^{2};

$s_{ок} = 64$ *см*^{2}; $G_с = 2{,}4$ *кг*; $V_к = 1370$ *см*^{3}; $П_к = 825$ *см*^{2}; $\beta = 0{,}28$; $\nu_0 = (1 + 0{,}28)^2 = 1{,}7$. По (229) $\varepsilon_p = Q = 100$.

Далее по пунктам электрического расчета:

1. $\sum p_{\text{доп}} = 0{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 825 \cdot 45 \left(1 + 0{,}28 \sqrt{1{,}7}\right) \cdot 100 = 4530$ *вт.*

2. $\sum p_{\text{доп}_\text{у}} = \dfrac{4530}{1{,}25} = 3630$ *вт.*

3. $p'_\text{к} = \dfrac{3630}{1 + 1{,}7} = 1345$ *вт,* $p'_\text{с} = 1{,}7 \cdot 1345 = 2285$ *вт.*

4. $p'_i = \dfrac{1}{2{,}4} \cdot \dfrac{2285}{1{,}6 \cdot 1{,}4} = 425$ *вт/кг.*

5. По рис. 47 $p'_n = 600$ *вт/кг*, $B = 10\,000 \sqrt{\dfrac{425}{600}} \approx 8500$ *гс.*

6. $p_\text{с} = p'_\text{с} = 2285$ *вт.*

7. $\dfrac{w}{E} = \dfrac{10^8}{4{,}44 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0{,}75 \cdot 9 \cdot 8500} = 0{,}0261$ виток/*в.*

8. $w_1 = \dfrac{9200 \cdot 0{,}0261}{1{,}1} = 220$; $w_2 = 1{,}1 \cdot 570 \cdot 0{,}0261 = 16$.

9. $j' = \sqrt{\dfrac{1345}{0{,}021 \cdot 0{,}1 \cdot 1370 \cdot 1}} = 21{,}6$ *а/мм*².

10. $I_\mu = \dfrac{9200}{2\pi \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0{,}015} = 6{,}5$ *а.* $I_1 = 2 \sqrt{2\left(\dfrac{16}{220} \cdot 160\right)^2 + 6{,}5^2} =$
$= 17{,}7$ *а.*

11. Изоляция — заливка термореактивным компаундом.

$$q'_1 = \sqrt{1{,}35} \cdot \frac{17{,}7}{21{,}6} \approx 1 \text{ мм}^2; \quad q'_2 = \sqrt{1{,}35} \cdot \frac{160}{21{,}6} = 8{,}6 \text{ мм}^2.$$

Для первичной обмотки выбираем провод ПЭВ-2 диаметром 1,16 *мм* ($q_1 = 1{,}06$ *мм*²). Коэффициент увеличения сопротивления $\dfrac{r}{r_=}$ по рис. 51 составляет 1,05, что допустимо. Для вторичной обмотки берем 4 провода ЛЭШО $0{,}07 \times 630$, наматываемые впараллель (суммарное сечение $4 \times 2{,}4 = 9{,}6$ *мм*²). Для ЛЭШО $\dfrac{r}{r_=} = 1$.

12. Конструкция катушек — по рис. 17.
Сопротивления обмоток: $R_1 = 1{,}16$ *ом*, $R_2 = 0{,}0082$ *ом.*

Величина $\text{к}_\text{ок} = \dfrac{1{,}06 \cdot 220 + 9{,}6 \cdot 16}{64 \cdot 10^2} = 0{,}06 < 0{,}1$, что и требуется.

13. После конструктивного размещения обмоток получено:
$l_\text{к1} = 24$ *см*, $\Delta = 0{,}5$ *см*; $\Delta_1 \approx \Delta_2 = 0{,}85$ *см*, $l_s \approx h = 10$ *см.*

По (21) $\Delta' = 0{,}5 + \frac{0{,}85 + 0{,}85}{3} = 1{,}07$ *см*.

По (21) $u_{\text{к}x} = \frac{2\cdot 220\cdot 1{,}07\cdot 24\left(160\cdot\frac{16}{220}\right)}{1{,}11\cdot 0{,}75\cdot 9\cdot 10\cdot 8500\cdot 2} = 0{,}102 < 0{,}15,$

что и требуется $\left(\text{так как } u_{\text{к}x} = \frac{\omega L_s}{R'_{\text{н}}}\right)$.

14. L_1 задано.

15. $\delta = \frac{1}{2}\cdot\frac{0{,}4\cdot 220^2\cdot 9}{0{,}015\cdot 10^8} = 0{,}18$ *см*; $\kappa_\delta = \sqrt{\frac{1 + 10\cdot 0{,}18}{0{,}9}} = 1{,}76;$

$$\delta_0 = 1{,}76\cdot 0{,}18 = 0{,}32 \text{ см}.$$

16 $p_{\text{к}} = 1{,}35\,(1{,}05\cdot 17{,}7^2 \cdot 1{,}16 + 160^2\cdot 0{,}0082) = 800$ *вт*.

17. $\nu = \frac{2285}{800} = 2{,}85;\quad \Delta\tau_{\text{к}} = \frac{(800 + 2285)\cdot 1{,}25}{100\cdot 0{,}9\cdot 10^{-3}\cdot 825\left(1 + 0{,}28\sqrt{2{,}85}\right)} =$

$$= 35^\circ < 45^\circ.$$

18. $\eta = 1 - \frac{(800 + 2285)\cdot 1{,}25}{10^3\cdot 90 + (800 + 2285)\cdot 1{,}25} = 0{,}959.$

19. Примем для режима испытаний при частоте 400 *гц* $B = 8500$ *гс;*

$$U_1'' = 4{,}44\cdot 400\cdot 220\cdot 0{,}75\cdot 9\cdot 8500\cdot 10^{-8} = 220 \text{ в};$$

$U_2'' = \frac{w_2}{w_1} U_1 = \frac{16}{220}\cdot 220 = 16$ *в*; по рис. 47 $p_{10}'' = 5$ *вт/кг*,

$p_{8,5}'' = \left(\frac{8500}{10\,000}\right)^2\cdot 5 = 3{,}6$ *вт/кг*; $\kappa_p = \kappa_{p\text{аз}} = 1{,}4$ (см. табл. 16),

$$p_{\text{с}}'' = \kappa_p\, p_{8,5}'' G_{\text{с}} = 1{,}4\cdot 3{,}6\cdot 2{,}4 = 12{,}2 \text{ вт}.$$

ЛИТЕРАТУРА

Агейкин Д. И. и др., Руководство по проектированию элементов и систем автоматики, Оборонгиз, 1959.

Бальян Р. Х., О проектировании трансформаторов малой мощности нормальной частоты, «Вестник электропромышленности», № 10, 1958, стр. 41.

Бальян Р. Х. и Бардинский С. И., К выбору оптимальной геометрии и конструкции трансформаторов малой мощности, «Электричество», № 2, 1959, стр. 53.

Бачелис Д. С., Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Справочник, Электрические кабели, провода и шнуры, Госэнергоиздат, 1958.

Булгаков Н. И., Расчет трансформаторов, Госэнергоиздат, 1958.

Васильев Д. В., Расчет трансформаторов, Ленинградская военно-электротехническая академия РККА им. С. М. Буденного, Ленинград, 1933.

Вейнберг М. Д., Эссенсон А. Я., Технология производства тороидальных трансформаторов с витыми магнитопроводами, «Радиотехническое производство», № 10, 1957.

Гурвич Е. И., Кондорский Е. И., Попова В. П., Проницаемость и потери магнитомягких сплавов разных толщин в переменных полях, Прецизионные сплавы, Сборник трудов ЦНИИЧМ, выпуск 15, Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, М., 1956, стр. 131.

Дымков А. М. и Фингерит Ш. Е., Расчет однофазных трансформаторов мощностью до 10 киловольтампер с естественным воздушным охлаждением, «Энергетик», № 1, 1957. стр. 33.

Ермолин Н. П. и Ваганов А. П., Расчет маломощных трансформаторов, Госэнергоиздат, 1957.

Займовский А. С. и Чудновская Л. А., Магнитные материалы, Госэнергоиздат, 1957.

Киссель Е. И., Высоковольтные малогабаритные сухие трансформаторы и дроссели, «Радиоэлектронная промышленность», № 7, 1958.

Михеев М. А., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1956.

Петров Г. Н., Электрические машины, Часть I, Трансформаторы, Госэнергоиздат, 1956.

Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1949.

Терентьев Б. П., Электропитание радиоустройств, Связьиздат, 1958.

Федосеев Д. Н., Технология изготовления силовых трансформаторов и дросселей, Госэнергоиздат, 1959.

Цыкин Г. С., Трансформаторы низкой частоты, Связьиздат, 1955.

Новые электроизоляционные материалы, выпуск 2, Центральное бюро технической информации Мосгорсовнархоза, М., 1958.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, Электроизоляционные материалы, часть первая, Свойства материалов. Под общей редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, Госэнергоиздат, 1958.

Справочник по электротехническим материалам, т. II, Электроизоляционные материалы, часть вторая, Методы испытания и применения материалов. Под общей редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, Госэнергоиздат, 1959.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

БАЛЬЯН РОБЛЕН ХОРЕНОВИЧ

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Рецензент и научный редактор канд. техн. наук *И. Г. Меерсон*

Редактор *Ю. И. Смирнов*

Технический редактор *Л. М. Шишкова*

Корректоры: *Э. В. Краснова* и *М. И. Исаенкова*

Оформление *Е. И. Васильева*

Сдано в набор 3/II 1961 г. Подписано к печати 20/VI 1961 г Формат бумаги 60 × 92[1]/16
Печ. л. 23,35 (вклейка). Уч.-изд. л. 23,1. Изд. № 900—59. М-38847.
Тираж 10 300 экз. Цена 1 руб. 31 коп. Зак. 2777.

Судпромгиз, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Типография № 4 УПП Ленсовнархоза. Ленинград, Социалистическая, 14

Замеченные опечатки

Стр	Строка	Напечатано	Должно быть
73	6 графа	В	в
232	12 сн ф-ла 161	$\sqrt{\quad .. \times 10^{-6})^3 \cdot \varphi_j},$	$\sqrt{\quad .. \times 10^{-6})^3} \varphi_j,$
253	8 и 11 сн	ρ_x	ρ
323	4 сн	$\sqrt{2E}$	$\sqrt{2}\ E$
353	7 сн	$1 \leqslant \lambda \leqslant \nu_0$	$1 < \nu < \nu_0$

Р. Х. Бальян. Трансформаторы малой мощности

Цена 1 р. 31 к.